

Bartłomiej Będkowski, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice
Jerzy Madej, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała

ANALIZA WYDAJNOŚCI RÓŻNYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH UKŁADU CHŁODZENIA SILNIKA ELEKTRYCZNEGO DO ZABUDOWY W KOLE

THE EFFICIENCY ANALYSIS OF VARIUS STRUCTURAL SOLUTIONS OF THE WHEEL MOTOR COOLING SYSTEM

Streszczenie: Praca prezentuje analizę wydajności różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu chłodzenia silnika do zabudowy w kole pojazdu. Analiza została przeprowadzona na przygotowanych przestrzennych modelach obliczeniowych z wykorzystaniem narzędzia do obliczeń CFD. W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych określono maksymalną temperaturę silnika dla różnych rozwiązań konstrukcji nośnej stojana oraz dla różnych kształtów kanału płaszcza wodnego. Analizy dokonano dla stanu ustalonego przy stałych stratach odpowiadających pracy S1 silnika, oraz stałym przepływie medium chłodzącego. Obliczenia przeprowadzono budując osobne modele dyskretnie dla każdego analizowanego przypadku. Przeprowadzone badania symulacyjne pokazały w jaki sposób dane zmiany konstrukcyjne wpływają na efektywność układu chłodzenia i posłużą do doskonalenia prototypu silnika do zabudowy w kole pojazdu.

Abstract: The analysis of the performance of various structural solutions of the cooling system for the in wheel car motor is presented in the work. The analysis was conducted on the prepared spatial calculation models using the CFD software. The maximum motor temperature for various solutions of the stator support structure and for different shapes of the water jacket channel was determined as a result of simulation. The analysis for a steady state with constant losses corresponding to the S1 motor operation point and the constant flow of the cooling medium was carried out. The calculations were made by building separate discrete models for each analyzed case. The information how the structural changes affect the efficiency of the cooling system and how to improve the prototype of the in wheel car motor was given as a result of conducted thermal simulations.

Słowa kluczowe: MES, CFD, obliczenia cieplne, układ chłodzenia, silnik w kole, napęd elektryczny

Keywords: FEM, CFD, thermal calculations, cooling system, wheel motor, electric drive

1. Wstęp

Wraz ze wzrostem zainteresowania samochodami elektrycznymi rozwijane są różne kierunki związane z napędami elektrycznymi. W ostatnim czasie, jednym z najbardziej rozpoznawalnych nurtów w dziedzinie trakcyjnych silników elektrycznych są silniki do zabudowy w piaście pojazdu. Rozwiązanie to nie jest nowe, po raz pierwszy wykorzystał je, na początku XX wieku Ferdinand Porsche do stworzenia pierwszego na świecie samochodu hybrydowego. Obecnie wraz z rozwojem elektromobilności idea umieszczenia silników w kołach jest ponownie rozwijana. Silniki tego typu mogą być szeroko stosowane w przemyśle pojazdów elektrycznych dla różnych zastosowań od małych samochodów miejskich, przez samochody osobowe i rodzinne, po samochody dostawcze i autobusy. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL podjął prace badawcze i projektowe, które pozwolą na świadczenie usług związa-

nych z projektowaniem i produkcją tego typu silników dla różnego rodzaju pojazdów.

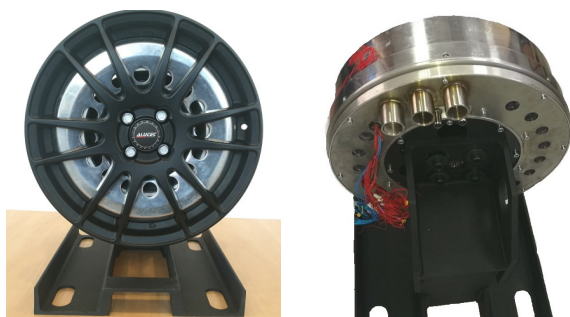
Niniejszy artykuł charakteryzuje część prac związanych z analizą konstrukcji tego typu silników pod względem możliwości efektywnego odbioru ciepła, co umożliwi uzyskanie jak najlepszych parametrów napędowych silnika przy zachowaniu jak najmniejszej jego masy.

Prace realizowane są w ramach programu LIDER VII finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

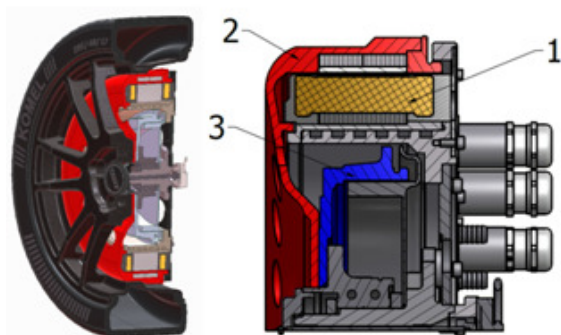
2. Konstrukcja prototypu silnika

W Instytucie KOMEL został opracowany prototyp silnika do zabudowy w kole (rys.1). Wymiary silnika zostały tak dobrane, aby istniała możliwość jego zabudowy w pojeździe przy zachowaniu istniejącego łożyskowania i układu hamulcowego. Silnik prototypowy bazuje na łożyskowaniu i układzie hamulcowym pocho-

dzącym z nowego Fiata Pandy III, natomiast, gabaryt zewnętrzny został ograniczony wymiarami felgi o rozmiarze 17 cali (rys.2). Silnik składa się z dwóch głównych elementów: wirnika i stojana. Źródłem ciepła w tego typu maszynie są straty w wirniku (magnesy, jarzmo) oraz w stojanie (uzwojenie, rdzeń). Znaczną część strat stanowią straty w stojanie. Żeby zapewnić odpowiedni odbiór ciepła z tego elementu w konstrukcji nośnej stojana wykonano płaszcz wodny, a pustą przestrzeń między nim a uzwojeniem wypełniono żywicą termo-przewodzącą (rys.3).



Rys. 1. Wykonany prototyp silnika do zabudowy w kole

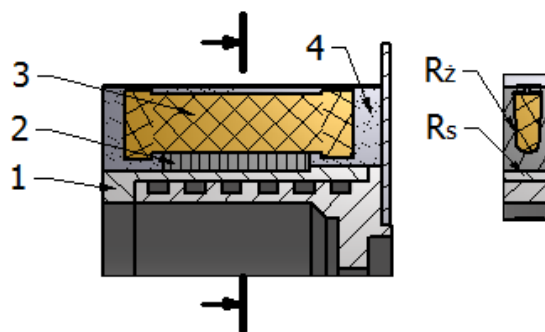


Rys. 2. Konstrukcja prototypowego silnika: 1) stojan, 2) wirnik, 3) oryginalna piasta z układem hamulcowym samochodu

3. Model obliczeniowy CFD

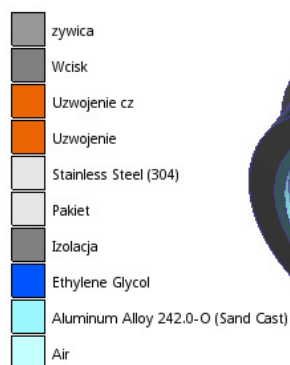
W celu oceny wydajności układu chłodzenia przeprowadzono analizę opartą na metodzie elementów skończonych (FEM) oraz komputerowej analizie dynamiki płynów (CFD), która jest wolniejsza od innych metod, takich jak np. schematy cieplne, i wymaga dużej mocy obliczeniowej, ale jej dużą zaletą jest to, że pozwala analizować urządzenia o dowolnej geometrii przy zastosowaniu dowolnych systemów chłodzenia. Jedynym ograniczeniem metody są możliwości obliczeniowe sprzętu komputerowego [1,3,5,6,7,9,10].

W celu przeprowadzenia analizy termicznej, w oparciu o metodę elementów skończonych, opracowano uproszony, trójwymiarowy model stojana silnika (Rys.3). Model został tak przygotowany aby uprościć geometrię, która nie ma wpływu na wydajność systemu chłodzenia i stan termiczny maszyny. Zastosowany model obejmuje: aluminiowy element nośny z płaszczem wodnym (1), uproszczony rdzeń stojana (2), uproszony model uzwojenia (3), żywica termoprzewodząca wypełniająca przestrzeń pomiędzy uzwojeniem, a konstrukcją nośną (4).

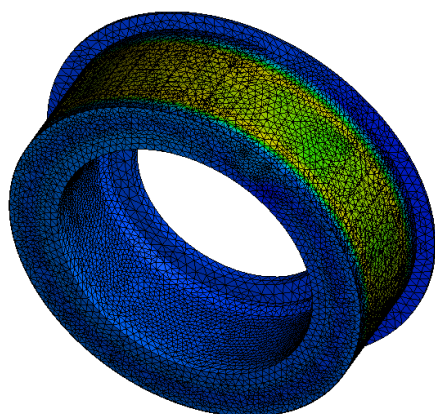


Rys. 3. Model obliczeniowy stojana silnika: 1 - element nośny stojana z płaszczem wodnym, 2 - rdzeń stojana, 3 - uzwojenie, 4 - żywica termo-przewodząca, Rz - zastępcza rezystancja cieplna izolacji żłobkowej, Rs - rezystancja cieplna między płaszczem a rdzeniem stojana

W programie do analizy CFD model (rys. 4) został dodatkowo uzupełniony o medium chłodzące w kanałach płaszcza wodnego. Założono także parametry zastępcze rezystancji cieplnych: Rs - rezystancji cieplnej odpowiadającej wciskowi pomiędzy rdzeniem, a konstrukcją płaszcza wodnego, Rz - rezystancji cieplnej odpowiadającej izolacji żłobkowej. Następnie model poddany został dyskretyzacji. Model dyskretny prezentuje rys.5.



Rys. 4. Model obliczeniowy 3D z ustalonymi parametrami materiałowymi



Rys. 5. Model dyskretny

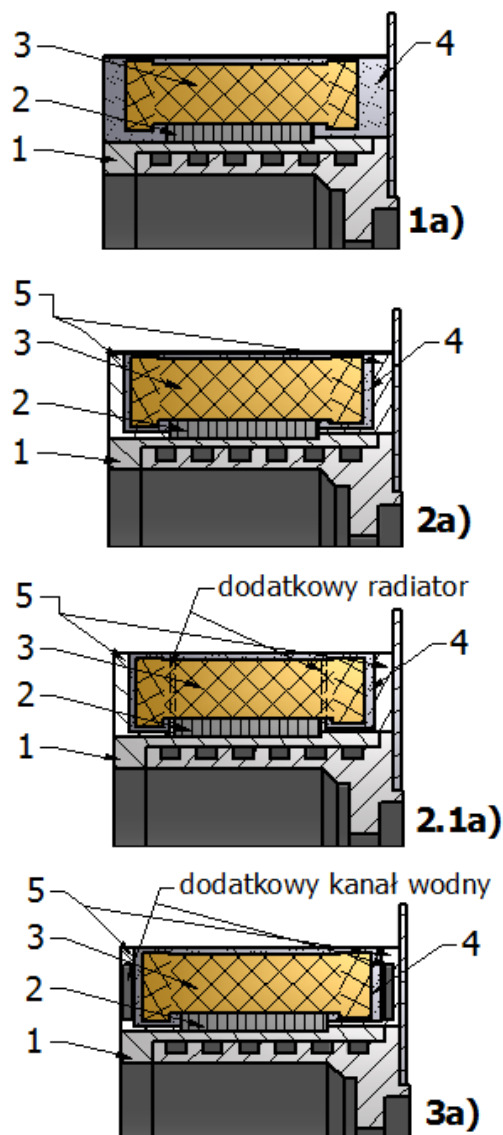
Wszystkie modele i obliczenia wykonano w programach *Autodesk Inventor* i *Autodesk Simulation CFD*.

4. Analiza różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu chłodzenia

Biorąc pod uwagę możliwości wykonania stojana przeanalizowano różne warianty jego konstrukcji. W analizie uwzględniono zarówno kształt samej konstrukcji nośnej stojana, jak również kanału płaszcza wodnego. Dla każdego wariantu utworzono odpowiedni model obliczeniowy uwzględniający wprowadzone zmiany.

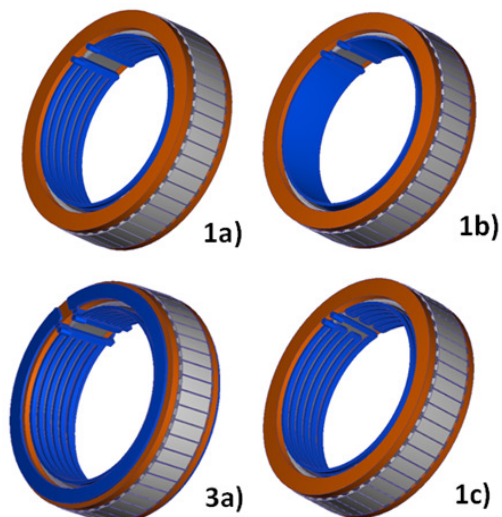
4.1. Analizowane układy chłodzenia

Na rys. 6 przedstawiono modele obliczeniowe analizowanych konstrukcji nośnych stojana. Model 1a charakteryzuje się cylindryczną konstrukcją nośną z płaszczem wodnym, na której osadzony jest pakiet stojana uzwojony. Przestrzeń między czołami uzwojenia, a konstrukcją nośną wypełniona jest termoprzewodzącą żywicą. W tej technologii wykonany został prototyp silnika. W modelu 2a dołożono 2 radiator w kształcie litery L zastępując częściowo przestrzeń pierwotnie wypełnioną przez żywicę. Rozwiązanie to ma na celu usprawnienie transportu ciepła pomiędzy uzwojeniem a płaszczem wodnym. Dodatkowo w tym samym celu w modelu 2.1a dołożono radiatory aluminiowe (blachy skrajne pakietu) o grubości 2mm. W modelu 3a dołożono, w radiatorach w kształcie litery L dodatkowe kanały płaszcza wodnego. Wszystkie te warianty posiadają płaszcz wodny z kanałami równoległymi (rozwiązania 1a rys. 7),



Rys.6. Analizowane warianty konstrukcyjne konstrukcji nośnej stojana: 1a) zastosowana sama żywica, 2a) dołożony aluminiowy radiator na zewnątrz uzwojenia, 2.1a) dołożony aluminiowy radiator pomiędzy rdzeniem a uzwojeniem, 3a) dołożony aluminiowy radiator z dodatkowym kanałem chłodzącym, 1 - element nośny stojana z płaszczem wodnym, 2 - rdzeń stojana, 3 - uzwojenie, 4 - żywica, 5 - aluminiowy radiator

Na rysunku 7 zilustrowano analizowane warianty kształtu kanału płaszcza wodnego. Model 1a ma 6 równoległe połączonych ze sobą kanałów. Model 1b posiada jeden szeroki kanał. Model 3a przedstawia rozwiązanie konstrukcyjne z dodatkowym kanałem przy czołach uzwojenia (3a rys. 6). W modelu 1c przeanalizowano rozwiązanie z szeregowym połączeniem 6 kanałów.



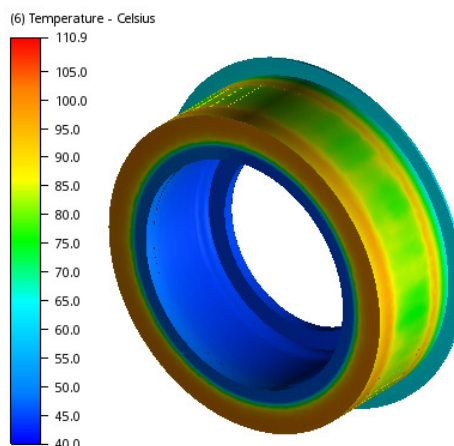
Rys. 7. Analizowane warianty konstrukcyjne płaszcza wodnego: 1a) kanały równoległe, 1b) kanał pełny, 3a) kanały równoległe + dodatkowy kanał przy czołach uzwojenia, 1c) kanały połączone szeregowo

Na tak przygotowanych modelach przeprowadzono obliczenia numeryczne, których wyniki przedstawiono w dalszej części artykułu.

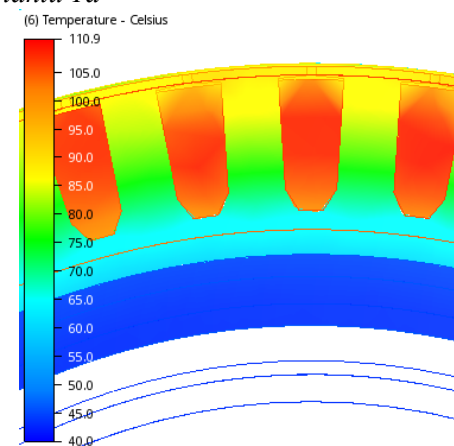
4.2. Wyniki analizy CFD

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla stanu ustalonego zakładając następujące warunki brzegowe: przyjęto konwekcję naturalną na powierzchni stojana $10\text{W/m}^2\text{K}$, przepływ cieczy chłodzącej (glikol) wynoszący 15 l/min . Założono temperaturę otoczenia i płynu na wejściu do płaszcza wodnego równą 40°C . Przyjęto straty w uzwojeniu - 293W i w rdzeniu - 1954W (szacowane dla pracy S1 przy 950obr/min i momencie 408Nm). Własności materiałowe (przewodności cieplne) odpowiadają parametrom materiałów zastosowanych w prototypie silnika. Rezystancje termiczne, zastępcze wartości materiałowe rdzenia i uzwojenia oszacowano na podstawie literatury i założeń konstrukcyjnych [2,4,8,11-14]. Na wartość tzw. oporów cieplnych R i zastępczych parametrów przewodności duży wpływ mają takie czynniki jak stosowana metoda impregnacji, materiały izolacyjne żłobka, sposób pakietowania blach rdzenia, czy sposób osadzenia stojana na konstrukcji nośnej (wcisk, pasowanie luźne). Wartości tych parametrów najlepiej jest zatem określić na podstawie stosownych badań na drodze kalibracji modelu obliczeniowego, podobnie jak w pracach [1-3]. Wtedy model może posłużyć do pełnych symulacji różnych stanów cieplnych maszyny. Kalibracja modelu zostanie

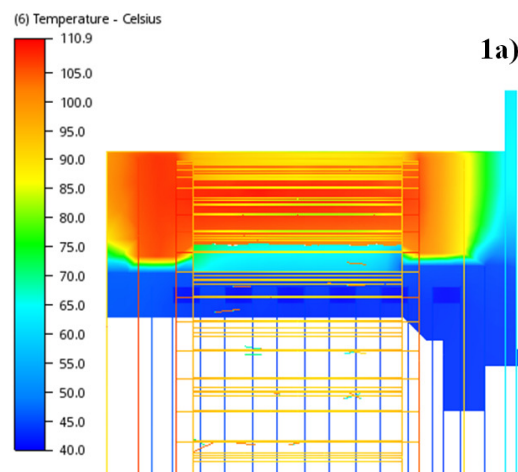
wykonana po wstępnych badaniach cieplnych prototypu. Na potrzeby analizy przydatności rozpatrywanych zmian konstrukcyjnych wystarczająco przyjęte przybliżone wartości parametrów cieplnych modelu. Wyniki analiz efektywności chłodzenia poszczególnych wariantów konstrukcyjnych przedstawiono na rysunkach 8-10 i w tabeli 1.

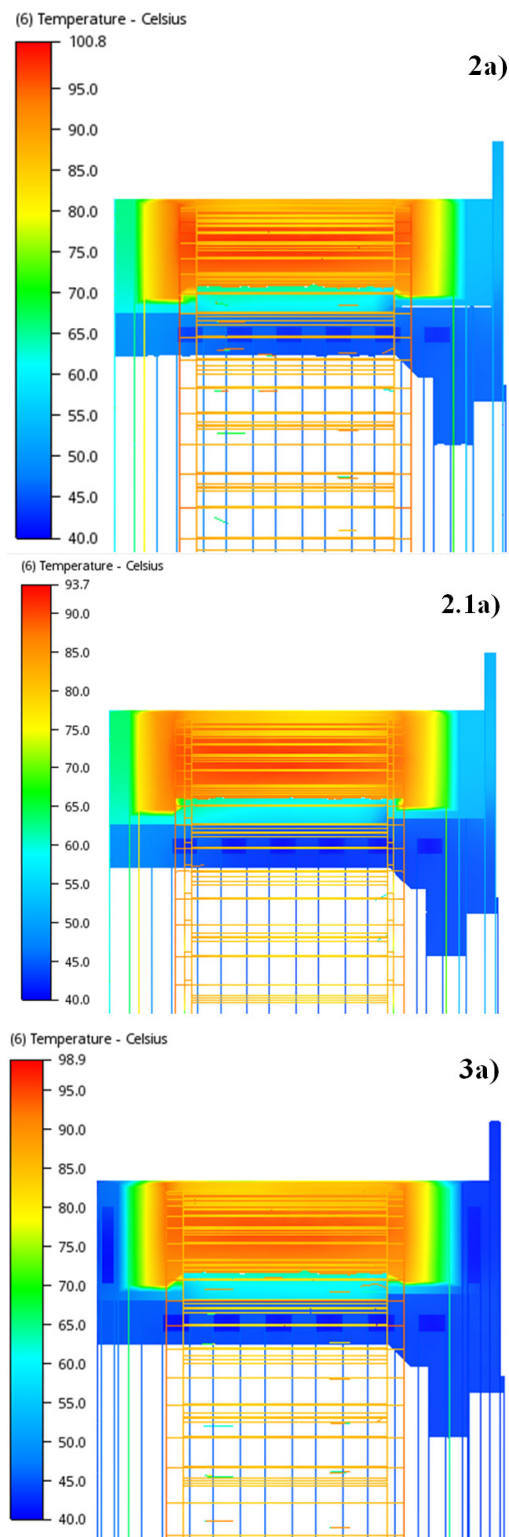


Rys. 8. Przykładowy rozkład temperatury dla wariantu 1a



Rys. 9. Przykładowy rozkład temperatury dla wariantu 1a - przekrój poprzeczny





Rys. 10. Rozkład temperatury- przekrój osiowy: 1a) zastosowana sama żywica, 2a) dołożony aluminiowy radiator na zewnątrz uzwojenia, 2.1a) dołożony aluminiowy radiator pomiędzy rdzeniem, a uzwojeniem, 3a) dołożony aluminiowy radiator z dodatkowym kanałem chłodzącym

Z przeprowadzonych symulacji można wywnioskować, że korzystne jest zastosowanie dodatkowych radiatorów aluminiowych wypełniających przestrzeń pomiędzy uzwojeniem, a konstrukcją nośną, które zastępują częściowo żywicę (rozwiązanie 3a). Radiatory te spowodowały obniżenie maksymalnej temperatury stojana silnika o ponad 17°C (to jest prawie o 25%). Wynika to z dużo większej przewodności cieplnej aluminium (około 200W/mK) niż żywicy termoprzewodzącej ($1,2\text{W/mK}$ najlepsza około $3\text{-}4\text{W/mK}$). Zastosowanie dodatkowego kanału płaszczu wodnego przy czołach uzwojenia (warian 3a) ma niewielki wpływ na obniżenie temperatury (zaledwie o $1,9^{\circ}\text{C}$) w porównaniu do wariantu z samym dodatkowym aluminiowym radiatorem (wariant 2a). Ponadto rozwiązanie to jest trudne do wykonania z technologicznego punktu widzenia. Analizując wpływ kształtu płaszczu wodnego można zauważyć, że najkorzystniej wypada płaszcz z kanałami połączonymi szeregowo (wariant 1a), a najgorzej z jednym kanałem (wariant 1b).

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń maksymalnej temperatury uzwojenia dla analizowanych wariantów

Wariant	Temperatura maksymalna uzwojenia [$^{\circ}\text{C}$]
1a	110.9
1b	114.4
1c	108.9
2a	100.8
2.1a	93.7
3a	98.9

5. Podsumowanie

Obliczenia efektywności różnego rodzaju rozwiązań konstrukcyjnych układu chłodzenia stojana silnika do zabudowy w kole są bardzo istotne. Wykorzystując modele obliczeniowe, na podstawie symulacji numerycznych, łatwo stwierdzić o ile można obniżyć temperaturę maszyny zmieniając jej konstrukcję. Przygotowane modele mogą posłużyć do oceny wydajności analizowanych wariantów konstrukcyjnych układu chłodzenia i pozwalają na wybranie optymalnego rozwiązania konstrukcyjnego. Po kalibracji modelu obliczeniowego przeprowadzonej w oparciu o badania laboratoryjne model będzie mógł być wykorzystany do analizy pracy silnika w stanach nieustalonych dla różnych parametrów obciążenia i zmiennych warunków

pracy. Na tej podstawie konstrukcja silnika będzie mogła być zoptymalizowana pod względem osiąganej mocy maksymalnej z jednostki masy, co jest bardzo istotnym parametrem takiej aplikacji.

6. Literatura

- [1]. Będkowski B., Madej J. „Własności cieplne pakietu blach elektrotechnicznych - badania i symulacje. Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe KOMEL, nr 2, 2015, s. 117-122.
- [2]. Będkowski B., Madej J. „Wyznaczenie zastępczej rezystancji cieplnej izolacji żłobkowej - badania i symulacje Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL, 2015, s. 123-127.
- [3]. Będkowski B., Madej J. „Obliczenia cieplne wirujących maszyn elektrycznych - problemy modelowania. Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe KOMEL, Nr 2/2017(114), 161-168.
- [4]. Hendershot J. R., Miller T. J. E. „Design of brushless permanent-magnet motors” Magna Physics Pub., 1994.
- [5]. Mejuto C., Mueller M., Shanel M., Mebarki A., Staton D. „Thermal modelling investigation of heat paths due to iron losses in synchronous machines” Proc. IEEE PEMD, 2008, s. 225-229.
- [6]. Mynarek P., Kowol M. „Analiza cieplna silnika PMSM za pomocą metody elementów skończonych i schematów cieplnych” Maszyny Elektryczne Zeszyty problemowe KOMEL 2014; 4(104): 49-54.
- [7]. Nategh S., Wallmark O., Leksell M., Zhao S. „Thermal Analysis of a PMSRM Using Partial FEA and Lumped Parameter Modeling” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 27, no. 2, 2012, s. 477-488.
- [8]. Pełczewski W. „Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych” Warszawa: PWT, 1956.
- [9]. SanAndres U., Almandoz G., Poza J., Ugalde G. „Design of Cooling Systems Using Computational Fluid Dynamics and Analytical Thermal Models” Industrial Electronics. IEEE Transactions 2014; 8(61): 4383-4391.
- [10]. Zhang B., Qu R., Xu W., Wang J., Chen Y., Thermal Model of Totally Enclosed Water-Cooled Permanent Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicle Applications, IEEE, Berlin, 2014: s. 2205-2211.
- [11]. Staton D. A., Electric Motor Cooling System Design, ICEM, Berlin, 2014.
- [12]. Siesing L., Reinap A., Andersson M., Thermal properties on high fill factor electrical windings: Infiltrated vs non infiltrated, IEEE, Berlin, 2014, s. 2218-2223.
- [13]. Soong W.L., Thermal Analysis of Electrical Machines: Limits and Heat Transfer Principles, Power Engineering Briefing Note Series, Lipiec 2008, s. 19-10.
- [14]. Miller T. J. E., SPEED's Electric Motors, University of Glasgow, 2002.

Autorzy

dr inż. Bartłomiej Będkowski
 b.bedkowski@komel.katowice.pl
 Instytut Napędów i Maszyn
 Elektrycznych KOMEL
 40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188

prof. ATH dr hab. inż. Jerzy Madej
 juma@ath.bielsko.pl
 Akademia Techniczno-Humanistyczna,
 Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
 Katedra Podstaw Budowy Maszyn,
 43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2

Informacje dodatkowe

Projekt „Innowacyjne Rozwiązania Napędu Bezpośredniego Pojazdów Elektrycznych”, współfinansowany ze środków NCBiR w ramach programu LIDER VII, zgodnie z umową: LIDER/24/0082/L-7/15/NCBR/2016.