

# Analiza wydajności różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu chłodzenia silnika elektrycznego do zabudowy w kole

Bartłomiej Będkowski, Jerzy Madej

## 1. Wstęp

Wraz ze wzrostem zainteresowania samochodami elektrycznymi rozwijane są różne kierunki związane z napędami elektrycznymi samochodów [14]. W ostatnim czasie jednym z najbardziej rozpoznawalnych nurtów w dziedzinie trakcyjnych silników elektrycznych są silniki do zabudowy w piśmie 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.

Institut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL podjął prace badawcze i projektowe, które pozwolą na świadczenie usług związanych 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.

## 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 pochodzącym z nowego Fiata Pandi 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 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 termoprzewodzącą (rys. 3).

## 3. Model obliczeniowy CFD

W celu oceny wydajności układu chłodzenia przeprowadzono analizę opartą na metodzie elementów skończonych (FEM) oraz na komputerowej analizie dynamiki płynów (CFD),

**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 przy stałym przepływie medium chłodzącego. Obliczenia przeprowadzono, budując osobne modele dyskretne 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.

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

## THE EFFICIENCY ANALYSIS OF VARIOUS STRUCTURAL SOLUTIONS OF THE WHEEL MOTOR COOLING SYSTEM

**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.

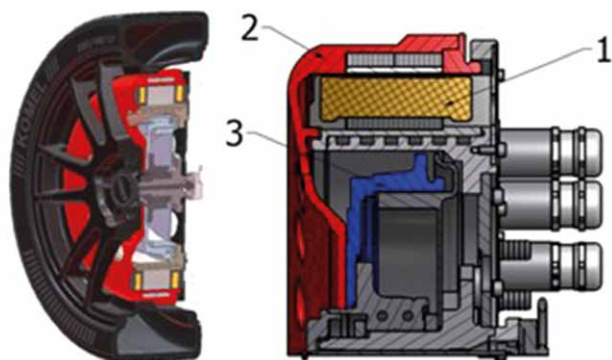
The information how the structural changes affect the efficiency of the cooling system and how to improve the prototype of the in wheel car motor was given as a result of conducted thermal simulations.

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

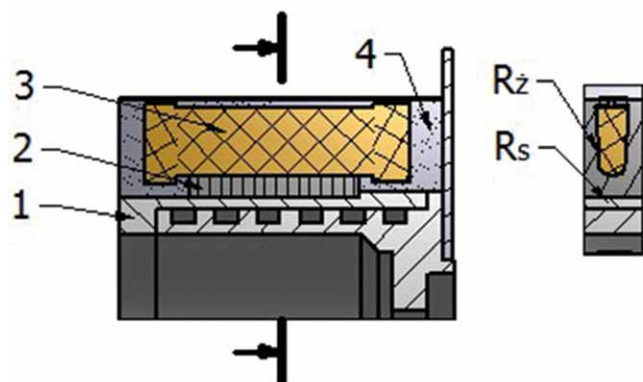
która jest wolniejsza od innych metod, takich jak np. schematy cieplne, i wymaga dużej mocy obliczeniowej, ale jej dużą zaletą



**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



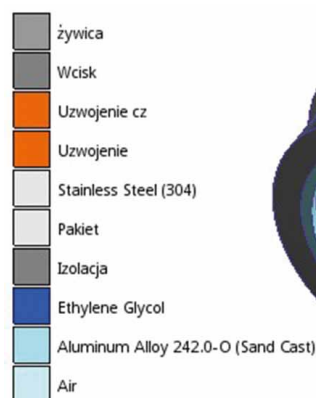
**Rys. 3.** Model obliczeniowy stojana silnika:  
1 - element nośny stojana z płaszczem wodnym; 2 - rdzeń stojana;  
3 - uzwojenie; 4 - żywica termoprzewodząca; Rz - zastępcza rezystancja cieplna izolacji żłobkowej; Rs - rezystancja cieplna między płaszczem a rdzeniem stojana

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), uproszczony model uzwojenia (3), żywicę termoprzewodzącą wypełniającą przestrzeń pomiędzy uzwojeniem a konstrukcją nośną (4).

W programie do analizy CFD model (rys. 4) został dodatkowo uzupełniony o medium chłodzące w kanałach płaszcza wodnego. Założono także parametry zastępcze rezystancji cieplnych:  $R_s$  - rezystancji cieplnej odpowiadającej wciskowi pomiędzy rdzeniem a konstrukcją płaszcza wodnego,  $R_z$  - 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 płaszcz wodnego. Dla każdego wariantu utworzono odpowiedni model obliczeniowy uwzględniający wprowadzone zmiany.

##### 4.1. Analizowane układy chłodzenia

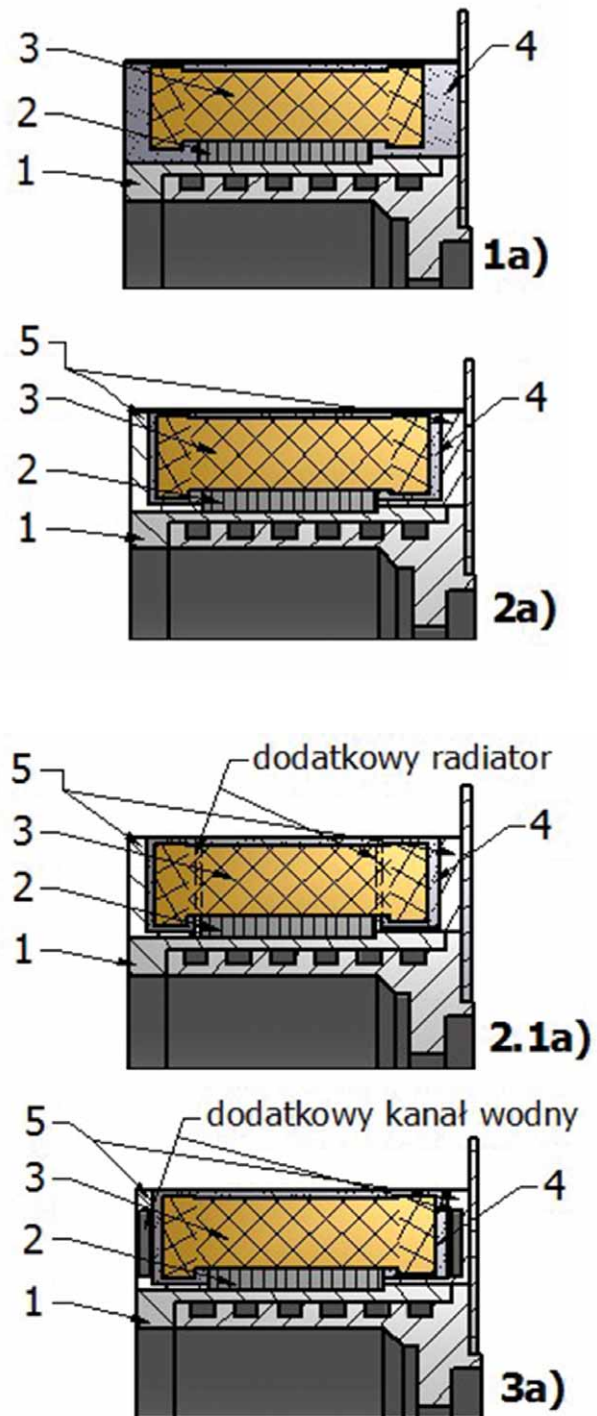
Na rys. 6 przedstawiono modele obliczeniowe analizowanych konstrukcji nośnych stojana. Model 1a charakteryzuje się cylindryczną konstrukcją nośną z płaszczem wodnym, na której osadzony jest pakiet stojana uzwojony. Przerznięcie między czołami uzwojenia a konstrukcją nośną wypełniona jest termoprzewodzącą żywicą. W tej technologii wykonany został prototyp silnika. W modelu 2a dołożono 2 radiatory 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 2 mm. W modelu 3a, w radiatorach w kształcie litery L dołożono dodatkowe kanały płaszcz wodnego. Wszystkie te warianty posiadają płaszcz wodny z kanałami równoległymi (rozwiązania 1a, rys. 7).

Na rysunku 7 zilustrowano analizowane warianty kształtu kanału płaszcz 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.

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

##### 4.2. Wyniki analizy CFD

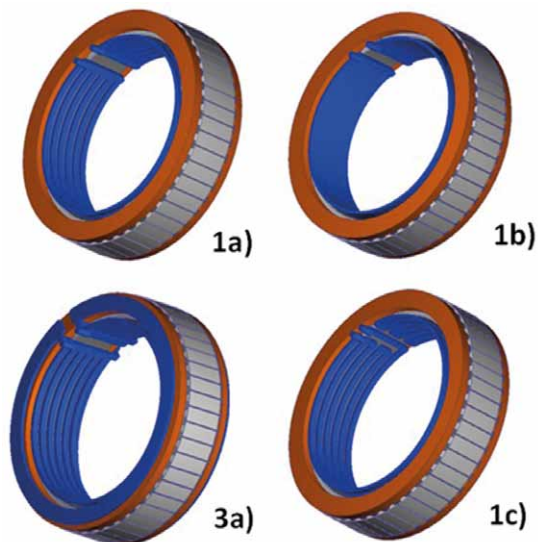
Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla stanu ustalonego, zakładając następujące warunki brzegowe: przyjęto konwekcję naturalną na powierzchni stojana  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , przepływ cieczy chłodzącej (glikol) wynoszący  $15 \text{ l/min}$ . Założono temperaturę otoczenia i płynu na wejściu do płaszcz wodnego równą  $40^\circ\text{C}$ . Przyjęto straty w uzwojeniu –  $293 \text{ W}$  i w rdzeniu –  $1954 \text{ W}$  (szacowane dla pracy S1 przy  $950 \text{ obr./min}$  i momencie  $408 \text{ Nm}$ ). 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, 11–13]. 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



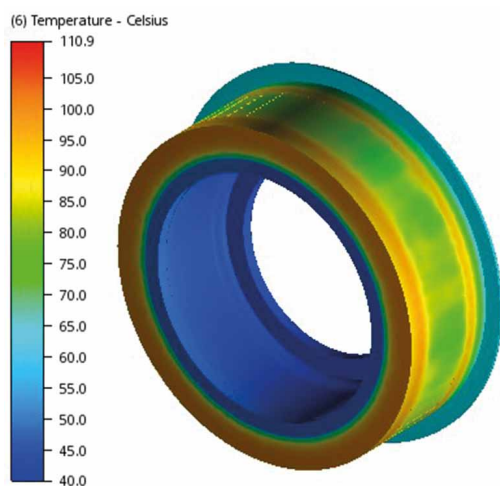
**Rys. 6.** Analizowane warianty konstrukcyjne konstrukcji nośnej stojana: 1a) zastosowana sama żywica; 2a) dołożony aluminiowy radiator na zewnątrz uzwojenia; 2.1a) dołożony aluminiowy radiator pomiędzy rdzeniem a uzwojeniem; 3a) dołożony aluminiowy radiator z dodatkowym kanałem chłodzącym.

1 – element nośny stojana z płaszczem wodnym; 2 – rdzeń stojana; 3 – uzwojenie; 4 – żywica; 5 – aluminiowy radiator

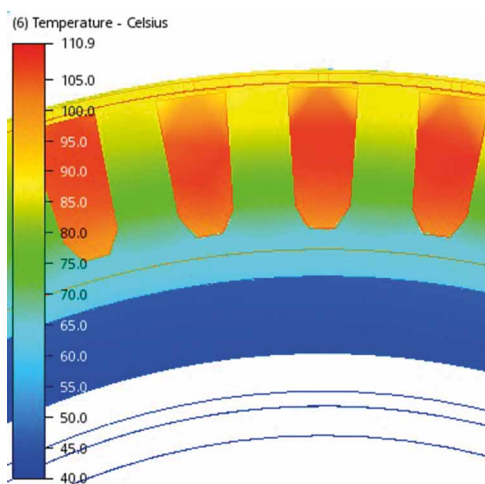
najlepiej jest zatem określić na podstawie stosownych badań na drodze kalibracji modelu obliczeniowego, podobnie jak w pracach [1–3]. Wtedy model może posłużyć do pełnych symulacji



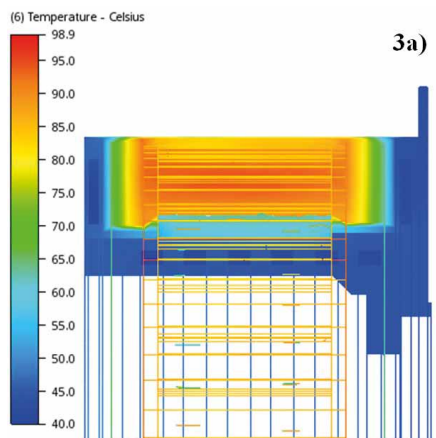
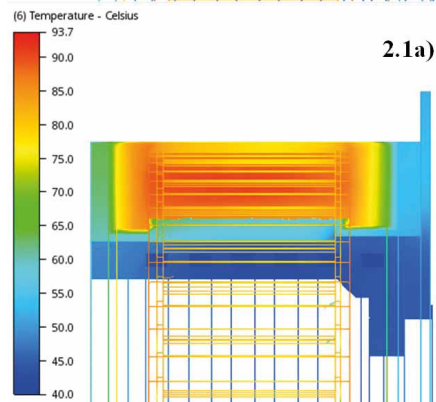
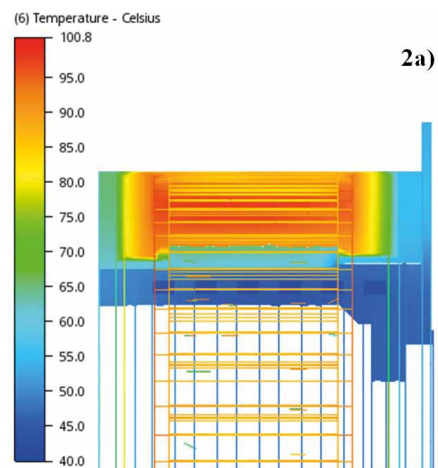
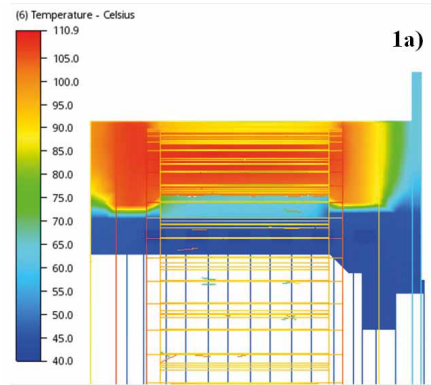
**Rys. 7.** Analizowane warianty konstrukcyjne płaszczki wodnego:  
1a) kanały równoległe; 1b) kanał pełny; 3a) kanały równoległe + dodatkowy kanał przy czołach uzwojenia; 1c) kanały połączone szeregowo



**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

różnych stanów cieplnych maszyny. Kalibracja modelu zostanie wykonana po wstępnych badaniach cieplnych prototypu.

Na potrzeby analizy przydatności rozpatrywanych zmian konstrukcyjnych wystarczą przyjęte przybliżone wartości parametrów cieplnych modelu.

Wyniki analiz efektywności chłodzenia poszczególnych wariantów konstrukcyjnych przedstawiono na rysunkach 8–10 i w tabeli 1.

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

Wariant	Temperatura maksymalna uzwojenia [°C]
1a	110,9
1b	114,4
1c	108,9
2a	100,8
2.1a	93,7
3a	98,9

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 200 W/mK) niż żywicy termoprzewodzącej (1,2 W/mK, najlepsza około 3–4 W/mK). Zastosowanie dodatkowego kanału płaszcz wodnego przy czołach uzwojenia (wariant 3a) ma niewielki wpływ na obniżenie temperatury (zaledwie o 1,9°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 płaszcz wodnego, można zauważyć, że najkorzystniej wypada płaszcz z kanałami połączonymi szeregowo (wariant 1a), a najgorzej z jednym kanałem (wariant 1b).

## 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 osiąganego mocy maksymalnej z jednostki masy, co jest bardzo istotnym parametrem takiej aplikacji.

## Literatura

- [1] BĘDKOWSKI B., MADEJ J.: Własności cieplne pakietu blach elektrotechnicznych – badania i symulacje. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2015.
- [2] BĘDKOWSKI B., MADEJ J.: Wyznaczenie zastępczej rezystancji cieplnej izolacji żłobkowej – badania i symulacje. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2015.
- [3] BĘDKOWSKI B., MADEJ J.: Obliczenia cieplne wirujących maszyn elektrycznych – problemy modelowania. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2017.
- [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.
- [6] MYNAREK P., KOWOL M.: *Analiza cieplna silnika PMSM za pomocą metody elementów skończonych i schematów cieplnych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 4/2014.
- [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.
- [8] PEŁCZEWSKI W.: *Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych*. PWT, Warszawa 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” 8(61)/2014.
- [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.
- [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.
- [13] MILLER T.J.E.: *SPEED's Electric Motors*. University of Glasgow, 2002.
- [14] DUKALSKI P., FRĘCHOWICZ A.: *Napęd pojazdu elektrycznego z dwustrefowym silnikiem BLDC*. Śląskie Wiadomości Elektryczne, Katowice 2011.

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.

 dr inż. Bartłomiej Będkowski

Institut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL,

e-mail: b.bedkowski@komel.katowice.pl;

prof. ATH dr hab. inż. Jerzy Madej

Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Budowy Maszyn

i Informatyki, Katedra Podstaw Budowy Maszyn,

e-mail: juma@ath.bielsko.pl

artykuł recenzowany