

Piotr Dukalski, Tomasz Wolnik, Bartłomiej Będkowski, Tomasz Jarek
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice
Andrzej Urbaś, Krzysztof Augustynek
Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała

ANALIZA PRACY SILNIKA ZABUDOWANEGO W PIAŚCIE KOŁA SAMOCHODU OSOBOWEGO DLA WYBRANYCH PARAMETRÓW JAZDY

ANALYSIS OF THE WORK OF AN ELECTRIC WHEEL HUB MOTOR FOR SELECTED DRIVING PARAMETERS OF CAR

Streszczenie: W artykule przedstawiono konstrukcję silnika trakcyjnego do zabudowy w piaście koła samochodu osobowego. Autorzy przedstawili obliczone parametry pracy silnika dla dwóch następujących po sobie etapów przejazdu. Pierwszy dotyczył jazdy z prędkością równą 150 km/h. Drugi etap obejmował jazdę z prędkością 50 km/h po powierzchni o nachyleniu 20 %. W artykule zostały przedstawione parametry pracy silnika dla każdego z etapów oraz wyniki analizy termicznej silnika w trakcie przejazdu.

Abstract: The construction of a electrical wheel hub traction motor for passenger car is presented in the article. Calculated parameters of operation for two consecutive ride stages are presented. The first one concerned driving at a speed of 50km/h. The second stage involved riding at 50km/h on a 20% slope. Parameters of motor work for each stage and the results of thermal analysis of the motor during the ride are presented.

Słowa kluczowe: silnik w piaście koła, silnik z magnesami trwałymi, samochód elektryczny, napęd elektryczny
Keywords: wheel hub motor, permanent magnet motor, electric car, electric drive

1. Wstęp

W obecnych czasach dynamiczny rozwój samochodów elektrycznych oraz szeroko pojętej elektromobilności stanowi wyzwanie dla wielu różnych podmiotów związanych z motoryzacją, energetyką, źródłami energii oraz z różnymi dziedzinami techniki od materiałoznawstwa po IT. Coroczny wzrost liczby zarejestrowanych pojazdów elektrycznych na świecie oraz zaangażowanie światowych liderów motoryzacji potwierdza stopniowe ukierunkowywanie rynku na rozwój elektromobilności. Pomagają temu również strategiczne działania poszczególnych państw, które różnymi działaniami promują użytkowanie przez obywateli samochodów elektrycznych oraz wprowadzają ograniczenia w dostęпах do centrów miast pojazdów o napędach spalinowych.

Pomimo tego, że rozwój samochodów elektrycznych jest napędzany przez znane marki samochodowe, stanowi on również szansę rozwoju rynku samochodowego w krajach gdzie nie jest on jeszcze wysoko rozwinięty. Znakiem przykładem firmy, która wykorzystała nowy potencjał rynku jest firma Solaris produkująca autobusy elektryczne nie tylko na rynek

krajowy, ale również zagraniczny [1]. Innym przykładem jest promująca nowy prototyp samochodu dostawczego - firma Ursus.

Podobnym kierunkiem rozwoju różnych inwestycji mogą być pojazdy elektryczne inne niż samochody osobowe np. pojazdy transportowe obsługujące hale produkcyjne czy lotniska, drony naziemne, motory, pojazdy wojskowe i pożarnicze, pojazdy turystyczne, minibusy.

Wzrost zainteresowania elektromobilnością ma przełożenie na profil działalności producentów napędów elektrycznych, którzy albo muszą szukać inwestorów realizujących przedsięwzięcie o odpowiednio wysokim prawdopodobieństwie sukcesu, zakończonego wdrożeniem na większą skalę albo dopasować swoje usługi do indywidualnych potrzeb klienta. KOMEL jest producentem napędów elektrycznych, których konstrukcja i parametry są dobierane pod indywidualne zamówienia [2, 3, 4, 5].

Na przestrzeni ostatnich kilku lat, Instytut zaobserwował wzrost zainteresowania napędami wykorzystującymi silniki zabudowane w piastach kół napędowych. Zapytania dotyczyły napędów dla pojazdów elektrycznych różnego

przeznaczenia: od samochodów elektrycznych po aplikacje wojskowe. Silniki tego typu stanowią jedną z najbardziej rozwijających się koncepcji rozwiązania układu napędowego samochodów elektrycznych. Takie rozwiązanie pozwala na zredukowanie liczby elementów pośredniczących w przełożeniu napędu z silnika na koło samochodu jak np. przekładnia mechaniczna czy mechanizm różnicowy.

Silniki zabudowane w piastach kół posiadają szereg zalet natomiast wiążą się również z wyzwaniem dla konstruktorów [6, 7]. Jednym z głównych problemów jakie należy rozwiązać na drodze projektowania i testów laboratoryjnych i technologicznych jest skuteczne odprowadzenie ciepła z silnika.

Z uwagi na dynamicznie postępujący rozwój elektromobilności oraz zapytania sektora prywatnego, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL podjął prace badawcze i projektowe, mające na celu opracowanie rozwiązań technicznych oraz technologicznych, które w efekcie pozwolą na świadczenie usług związanych z projektowaniem i produkcją tego typu silników dla różnego rodzaju pojazdów.

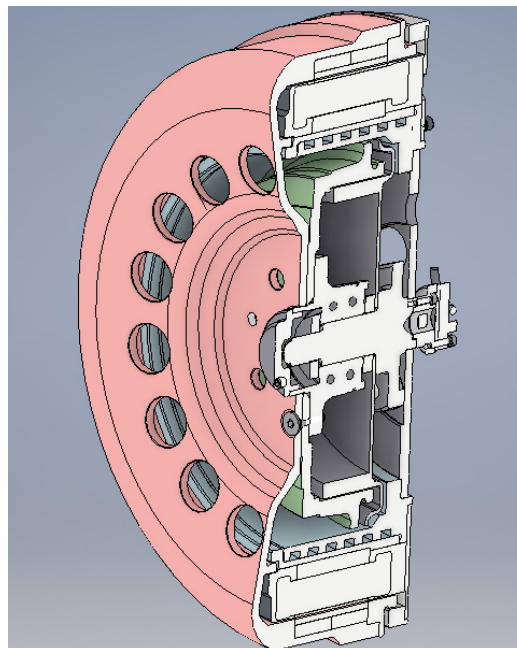
Prace realizowane są w ramach programu LIDER VII finansowanego przez Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

2. Konstrukcja silnika

Wybraną aplikacją dla opracowywanego w ramach projektu silnika jest samochód typu Fiat Panda III. Wymiary gabarytowe silnika zostały dopasowane do felgi 17". Dostępna dla konstruktora silnika przestrzeń projektowa jest ograniczona średnicą zewnętrzną felgi, jej kształtem, osadzeniem felgi (ET) oraz bębniem hamulcowym (jeżeli jest uwzględniony w układzie hamulcowym). W skład elementów ruchomych silnika wchodzi korpus z rdzeniem magnetycznym i magnesami trwałymi stanowiący zewnętrzną część napędu.

Elementy nieruchome tworzą: tarcza stała, konstrukcja wsporcza wyposażona w układ chłodzenia stojana oraz stojan. Na rysunku 1 pokazano również przekrój przez bęben hamulcowy, który nie stanowi elementu silnika, natomiast jest zamontowany w jego wnętrzu. Układ łożyskowania samochodu i silnika jest wspólny.

Tarcza nieruchoma, przez którą są wyprowadzone przewody zasilające silnika oraz przewody sterownicze stanowi również element części montażowej silnika w samochodzie.



Rys. 1. Model 3D przekroju silnika

3. Parametry pracy silnika

Aby silnik mógł być zastosowany w napędzie samochodu jako napęd bezpośredni powinien spełniać określone wymagania dotyczące momentu maksymalnego, prędkości maksymalnej, mocy maksymalnej, jak również wymagania związane z zagadnieniami termicznymi. Można założyć, że krytycznym punktem pracy związanym z problemem odprowadzenia ciepła dla samochodu osobowego jest praca silnika podczas długotrwałej jazdy z prędkością maksymalną po powierzchni płaskiej. Dla przyjętej przez zespół projektowy aplikacji (samochód osobowy o masie maksymalnej 1600 kg) jest to prędkość postępową pojazdu równa 150 km/h, co dla bezpośredniego przełożenia momentu i przyjętego ogumienia jest równe prędkości obrotowej silnika 1362 obr/min. W tym punkcie pracy silnik musi generować moment obrotowy o wartości co najmniej 150 Nm, aby pokonać opory ruchu pojazdu. Najważniejszą jednak kwestią jest to, aby w tym punkcie pracy możliwym było skuteczne odprowadzenie powstałej na skutek strat energii cieplnej. Kolejnym charakterystycznym parametrem, który musi zapewnić silnik jest wymagany maksymalny, chwilowy moment obrotowy oraz zakres prędkości obrotowej silnika. Od wartości maksymalnego momentu obrotowego zależy przyspieszenie pojazdu oraz możliwość pokonywania odpowiednich wzniesień. Dla zaprojektowanego przez zespół projektowy silnika

maksymalny moment obrotowy na kole wynosi ok. 900 Nm. W tym przypadku, przy założonej masie pojazdu 1035 kg (Fiat Panda) oraz wadze podróżującego pasażera równej 85 kg, samochód jest w stanie osiągnąć prędkość od 0 do 100 km/h w ciągu ok. 6,3 s. Przy założonej maksymalnej masie pojazdu Fiat Panda 1600 kg prędkość 0 do 100 km/h samochód osiągnie w ciągu ok. 8,7 s. W tab. 1 zostały przedstawione obliczone parametry pracy silnika: znamionowe (jazda z prędkością maksymalną po płaskim terenie), przy maksymalnym momencie obrotowym M_{max} oraz dla jazdy przy nachyleniu $\alpha_s = 20\%$ z prędkością $v = 50$ km/h.

Tabela 1. Obliczone parametry silnika dla różnych punktów pracy

	M_{max}	$v = 150$ km/h $\alpha_s = 0$	$v = 50$ km/h $\alpha_s = 20\%$
U [V]	200	200	105
I [A]	350	90	165
P [kW]	79	21,4	23,6
M [Nm]	890	150	500
n [obr/min]	850	1362	454
Suma strat ΔP [kW]	12,9	1,2	2,73

4. Straty mocy

Jednym z głównych aspektów podczas projektowania silnika o konstrukcji kompaktowej jest odpowiednie ograniczenie strat mocy w poszczególnych elementach silnikach, które mogą zaważyć na możliwych do uzyskania parametrach pracy silnika. W zdecydowanej większości rozwiązań konstrukcyjnych silników elektrycznych, głównym źródłem ciepła jest uzwojenie, którego maksymalną temperaturę pracy ogranicza wytrzymałość termiczna izolacji. W przypadku silników z magnesami trwałymi, w konstrukcji obwodu elektromagnetycznego uzwojenie występuje tylko w stojanie. Generowane straty mocy, w postaci ciepła są odprowadzane przez powietrze oraz rdzeń magnetyczny do kadłuba silnika lub innych elementów jak np. elementów wsporczych, na których osadzony jest stojan, jak w prezentowanym silniku. Termicznie najbardziej obciążoną częścią uzwojenia są jego czoła, ponieważ standardowo ich wybudowa znajduje się poza żłobkiem stojana i nie przylega do rdzenia (co jest uza-

leżnione od sposobu uzwojania, konstrukcji i technologii wykonania rdzenia stojana oraz typu uzwojenia). Coraz bardziej popularnym rozwiązaniem, mającym na celu zwiększenie efektywności odprowadzania ciepła z uzwojenia staje się zalewanie uzwojonych rdzeni magnetycznych w żywicach termoprzewodzących, które charakteryzuje w stosunku do powietrza duża przewodność cieplna nawet do 3,5 W/mK. W prezentowanym rozwiązaniu, zastosowana żywica epoksydowa o przewodności cieplnej 1,3 W/mK odprowadza wydzielane przez uzwojenie w części czołowej ciepło do konstrukcji wsporczej, w której zabudowany jest labirynt z wymuszonym przepływem cieczy. W ramach Projektu Lider 7 zostały przeprowadzone symulacje termiczne dla różnych typów żywic oraz różnych konstrukcji układu chłodzenia. Wyniki zostaną przedstawione w kolejnych publikacjach. W silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi o cewkach skupionych, pracujących w szerokim zakresie częstotliwości pojawia się dodatkowo problem strat w magnesach trwałych oraz rdzeniu wirnika [8, 9]. Wartość tych strat należy ograniczyć poprzez różnego rodzaju zabiegi konstrukcyjne, gdyż parametry magnesów trwałych, są ściśle zależne od ich temperatur, a przekroczenie temperatur dopuszczalnych może prowadzić do ich trwałego rozmagnesowania.

5. Obliczenia termiczne dla wybranych parametrów pracy silnika

W celu poznania rozkładu temperatur w różnych stanach pracy silnika zostały wykonane modele termiczne silnika, w których zostały zadane obliczone straty mocy, przedstawione w tabeli 2. Straty zostały obliczone dla punktów pracy odzwierciedlających charakterystyczne stany pracy silnika, podane w tabeli 1.

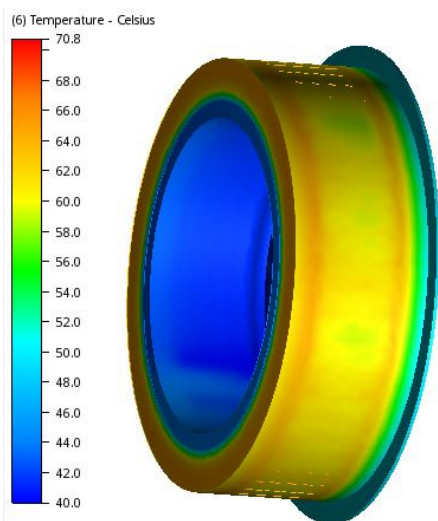
Założono krytyczny scenariusz przejazdu samochodu, w którym pojazd najpierw jedzie ze stałą prędkością maksymalną 150 km/h a następnie wjeżdża na wzniesienie 20% z prędkością 50 km/h przez ok. 1,5 min co jest równoznaczne z przebyciem drogi równej 1 km. Do obliczeń termicznych przyjęto założenie, że silnik przy prędkości 150 km/h uzyskał temperatury ustalone, które zostały potraktowane jako temperatury początkowe dla drugiego etapu scenariusza jazdy.

W tabeli 2 przedstawione zostały wybrane straty dla obu etapów "scenariusza".

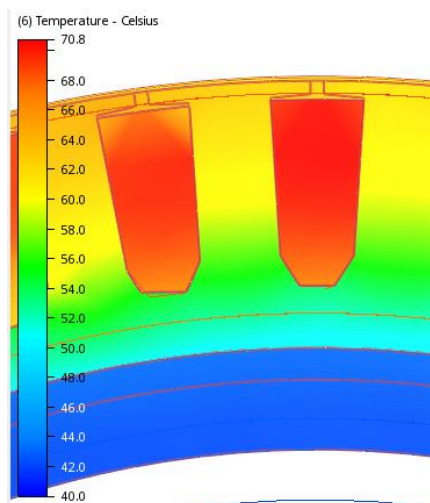
	$v = 150 \text{ km/h}$	$v = 50 \text{ km/h}$
	$\alpha_s = 0$	$\alpha_s = 20\%$
$\Delta P_{FeR} [\text{W}]$	29,2	37,2
$\Delta P_{FeS} [\text{W}]$	347,7	116,6
$\Delta P_{FeMag} [\text{W}]$	133,6	115
$\Delta P_{Cu} [\text{W}]$	729,0	2460

Na rysunku 3 zostały przedstawione wyniki obliczeń termicznych dla etapu 1 (rysunek 2 i 3) i dla etapu 2 (rysunek 4) przy temperaturze otoczenia równej 40°C .

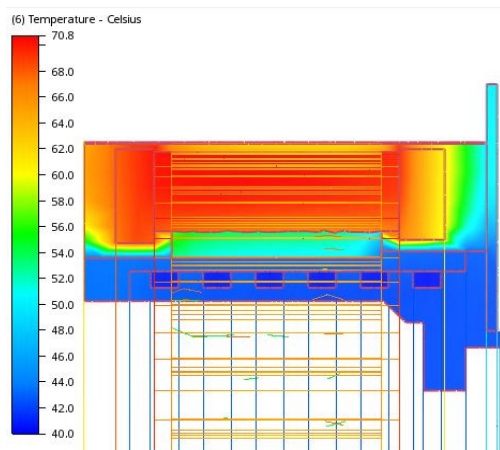
a)



b)

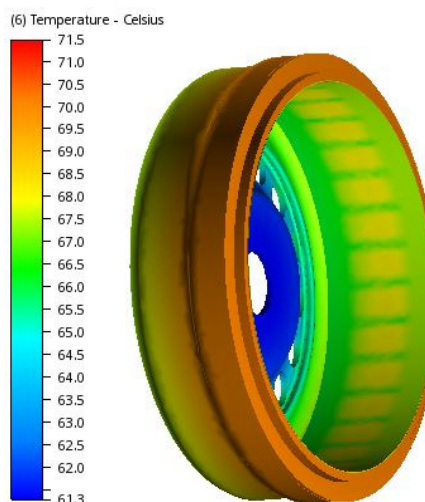


c)

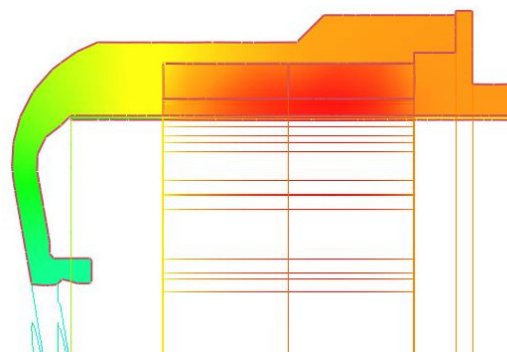


Rys. 2. Wyniki obliczeń termicznych przy stałej prędkości pojazdu 150 km/h po nachyleniu powierzchni 0% i przepływie chłodziwa 15 l/min a) stojan b) przekrój poprzeczny stojana c) przekrój wzdłużny stojana

a)



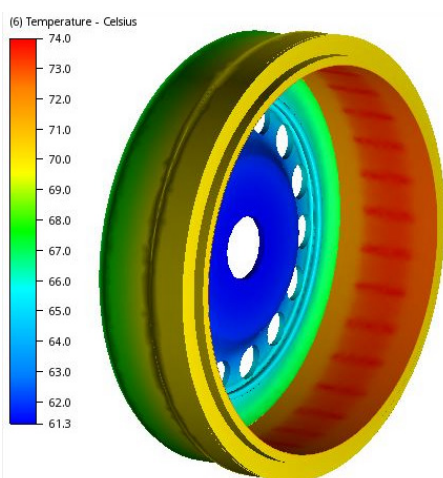
b)



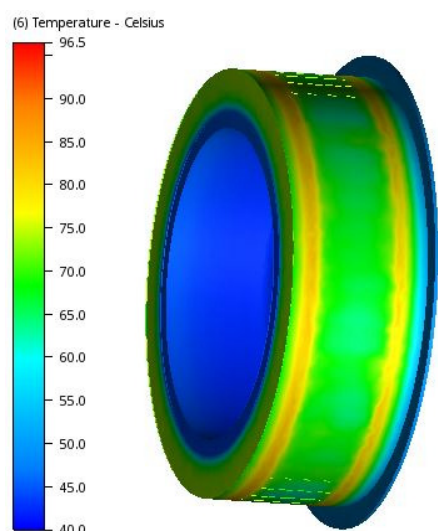
Rys. 3. Wyniki obliczeń termicznych przy stałej prędkości pojazdu 150 km/h po nachyleniu powierzchni 0% i przepływie chłodziwa 15 l/min a) wirnik b) przekrój wirnika

Z przedstawionych na rysunkach 2 i 3 wyników symulacji pracy silnika można odczytać maksymalne temperatury, jakie pojawiły się na elementach silnika. Maksymalna temperatura, zgodnie z przewidywaniami wystąpiła w uzwojeniu ($71,5^{\circ}\text{C}$), co jest szczególnie dobrze widoczne na rysunku 2b. Na rysunku 2c przedstawiony został przekrój wzdłużny stojana, na którym widać, że temperatura czoł uzwojeń jest niższa o ok. 8°C po stronie tarczy montażowej silnika niż w czołach po stronie przeciwnej. Powodem jest dodatkowy radiator jaki stanowi tarcza montażowa dla uzwojenia.

a)



b)



Rys. 4. Wyniki obliczeń termicznych przy stałej prędkości pojazdu 50 km/h po nachyleniu powierzchni 20% , przy temperaturach początkowych jak na rysunkach 2 i 3 i przepływie chłodziwa 15 l/min a) wirnik b) stojan

Maksymalna temperatura w wirniku została zaobserwowana w magnesach trwałych na poziomie 74°C . Uzyskany rozkład temperatury nie stanowi zagrożenia dla pracy silnika.

Od stanu termicznego zaprezentowanego na rysunkach 2 i 3 rozpoczęto symulację pracy w etapie 2. Wyniki symulacji etapu 2 zostały zaprezentowane na rysunku 4. Otrzymane temperatury również nie stanowią zagrożenia dla pracy silnika. W tabeli 3 przedstawiono zestawienie temperatur w poszczególnych elementach silnika.

Tabela 3. Obliczone temperatury maksymalne w stojanie i w wirniku

	Obliczona temperatura	
	stojan uzwojenie	wirnik magnesy
temperatura etap I [$^{\circ}\text{C}$]	70,8	74
temperatura etap II [$^{\circ}\text{C}$]	96,5	71,5
temperatura dopuszczalna [$^{\circ}\text{C}$]	180	120

6. Wnioski

W artykule została przedstawiona konstrukcja trakcyjnego silnika synchronicznego, wzbudzanego magnesami trwałymi, przeznaczonego do zabudowy w kołach napędowych samochodu elektrycznego. Zostały również zaprezentowane obliczone parametry pracy silnika w charakterystycznych punktach. Autorzy artykułu zaprezentowali metodę analizy pracy silnika w napędzie Fiat Panda na przykładzie wybranego scenariusza jazdy samochodu. Wyniki obliczeń na modelach termicznych stanowią wynik decydujący o możliwości pracy silnika w przedstawionym cyklu obciążenia.

Osiągnięte temperatury w kluczowych miejscach silnika, jakimi jest uzwojenie silnika oraz magnesy trwałe według obliczeń nie stanowią zagrożenia dla jego pracy w zaprezentowanych warunkach. Tego typu obliczenia, bazujące na obliczeniach strat w obwodzie elektromagnetycznym oraz na modelu do obliczeń termicznych pozwalają na oszacowanie występujących temperatur w trakcie pracy silnika.

Przedstawiona w artykule metoda obliczeniowa pozwala konstruktorom na obliczanie temperatury pracy silnika w najbardziej niekorzystnych warunkach obciążenia, co może pomóc nie tylko w ocenie niezawodności silnika, ale również wskazuje możliwości optymalizacji jego

konstrukcji np. w zakresie zmniejszenia masy, lub zwiększenia czasu pracy z danym obciążeniem. Kolejnym etapem realizowanych prac będzie weryfikacja obliczeń na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych.

Literatura

- [1]. <https://solarisbus.com>
- [2]. E. Król „Silniki Elektryczne w Napędach Pojazdów Sportowo-Rekreacyjnych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2014 (102).
- [3]. E. Król, R. Rossa „Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi jako napęd pojazdu hybrydowego”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 4/2012 (97).
- [4]. W. Radwański, B. Będkowski, A. Białas, R. Rossa „Koncepcja napędu elektrycznego „E-Kit” dla miejskich samochodów osobowych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 4/2012 (97).
- [5]. www.komel.katowice.pl/elektromobilnosc.html
- [6]. P. Dukalski, B. Będkowski, T. Wolnik, A. Urbaś, K. Augustynek „Założenia projektu silnika do zabudowy w piaście koła samochodu elektrycznego”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 2/2017.
- [7]. J. Dzida „Porównanie różnych sposobów kierunkowego napędzania pojazdów silnikami elektrycznymi Napędy i Sterowanie”, Nr 2 Luty 2017.
- [8]. I. Petrov, D. Egorov, J. Link, R. Stern, S. Ruoho “Hysteresis Losses in Different Types of Permanent Magnets Used in PMSMs”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, doi 10.1109/TIE.2016.2548440.
- [9]. K. Yamazaki, M. Shina, Y. Kanou, M. Miwa, J. Hagiwara “Effect of Eddy Current Loss Reduction by Segmentation of Magnets in Synchronous Motors: Difference Between Interior and Surface Types”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(10), 2009.

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.

Autorzy

mgr inż. Piotr Dukalski
p.dukalski@komel.katowice.pl
dr inż. Bartłomiej Będkowski
b.bedkowski@komel.katowice.pl
mgr inż. Tomasz Wolnik
t.wolnik@komel.katowice.pl
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL

dr inż. Andrzej Urbaś
aurbas@ath.bielsko.pl
dr inż. Krzysztof Augustynek
kaugustynek@ath.bielsko.pl
Akademia Techniczno-Humanistyczna
w Bielsku-Białej