

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

BADANIA PROTOTYPOWEGO SILNIKA ELEKTRYCZNEGO DO ZABUDOWY W KOŁACH SAMOCHODU

TESTS OF PROTOTYPE ELECTRIC MOTOR FOR INSTALLATION IN A CAR WHEEL

Streszczenie: W artykule przedstawiono budowę stanowiska badawczego, przeznaczonego do badań elektrycznego silnika synchronicznego, wzbudzanego magnesami trwałymi z wirnikiem zewnętrznym. Badano silnik trakcyjny, przeznaczony do zabudowy w piaście koła samochodu elektrycznego. Stanowisko badawcze pozwala na pomiar parametrów elektromechanicznych oraz temperatury. Z uwagi na kompaktową konstrukcję badanego silnika oraz stosunkowo wysokie częstotliwości zasilania stanowisko badawcze umożliwia również rejestrowanie temperatury elementów wirnika. W pracy przedstawiono również platformę badawczą do badania wpływu dodatkowej masy nieresorowanej, jaką stanowią silniki montowane w kołach, na komfort jazdy samochodem oraz pracę zawieszenia.

Abstract: The construction of a laboratory bench designed for testing an electric synchronous motor, excited with permanent magnets with an external rotor, is presented in the paper. A traction motor, designed for installation in the wheel hub of an electric car, was tested. The laboratory bench allows the measurement of electromechanical parameters and temperature. Due to the compact design of the tested motor and relatively high frequency of power supply, the test stand also allows recording the temperature of the rotor elements. In the paper a research platform to study the impact of the additional unsprung mass which are motors mounted in wheels for the comfort of car driving and suspension work is also presented.

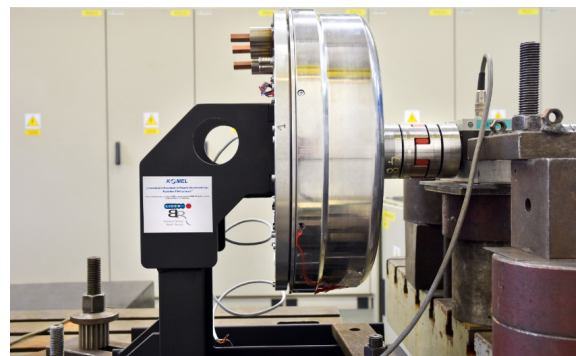
Słowa kluczowe: badanie silników elektrycznych, silnik w piaście koła, samochód elektryczny, masa nieresorowana

Keywords: testing of electric motors, wheel hub motor, electric car, unsprung mass

1. Wstęp

W przeciągu ostatnich lat Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL zrealizował szereg prac projektowych oraz badawczych w zakresie napędów dla różnego typu pojazdów elektrycznych [1-5]. Jeden z obecnie realizowanych projektów w dziedzinie elektromobilności dotyczy silników napędu bezpośredniego, montowanego w piastach kół pojazdów, co jest związane z potrzebą realizacji badań w szerokim zakresie. Spośród zagadnień prac konstrukcyjno-doświadczalnych, mających na celu opracowanie i wykonanie wyrobu, można wyróżnić te najistotniejsze: określenie założeń projektowych, modelowanie i symulacja komputerowa, opracowanie dokumentacji projektowej i wykonanie prototypu oraz weryfikacja doświadczalna [6]. Poszczególne etapy procesu są ściśle od siebie zależne. Szczególne znaczenie dla oceny skuteczności procesu projektowania stanowią rezultaty badań rzeczywistego mo-

delu. Pozwalają one ocenić poprawność wykonanych prac obliczeniowych i projektowych, a także zweryfikować założenia wstępne. Wnioski wyciągnięte z badań powinny posłużyć do ewentualnej kolejnej iteracji procesu projektowania w celu poprawienia funkcjonalności wyrobu.



Rys. 1. Prototyp silnika synchronicznego do zabudowy w kole samochodu

W ramach projektu realizowanego w Instytucie KOMEL został zaprojektowany i wykonany silnik PMSM z wirnikiem zewnętrznym do zabudowy w kole samochodu [7]. Jeden z prototypów przedstawiono na Rys. 1.

W celu określenia parametrów konstruowanego silnika (zarówno elektromechanicznych jak i termicznych) przeprowadzono szereg badań mających na celu analizę zgodności właściwości rzeczywistych z projektowanymi. Dodatkowo, analizie poddano również pracę układu zawieszenia samochodu docelowego (Fiat Panda) z zamontowanymi masami odpowiadającymi masie silnika w kołach tylnej osi w celu weryfikacji stosowanych wirtualnych modeli obliczeniowych pracy zawieszenia.

2. Badania parametrów silnika

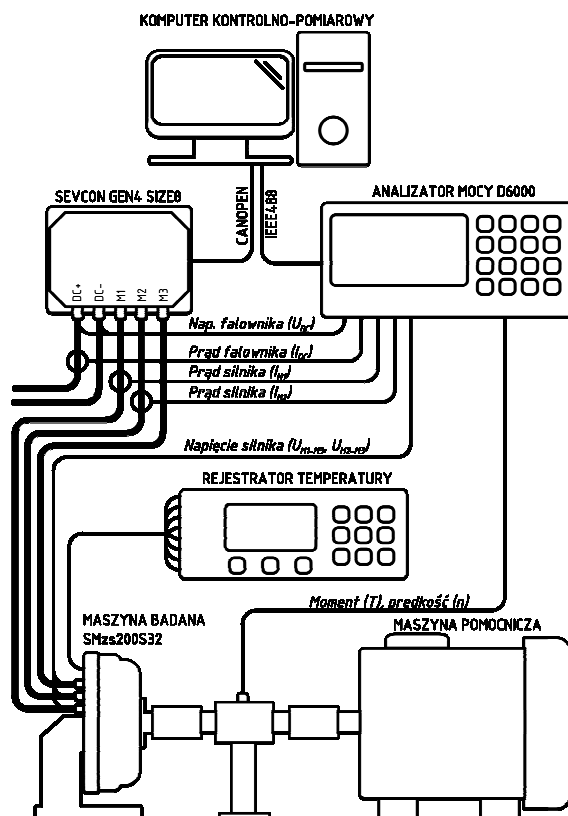
2.1. Program badań

W programie badań laboratoryjnych omawianego silnika zostały uwzględnione m.in. następujące próby i testy:

- pomiar charakterystyki biegu jałowego podczas pracy prądnicowej: rejestracja czasowa siły elektromotorycznej generowanej w uzwojeniach przy prędkości znamionowej oraz wyznaczenie charakterystyki;
- pomiar charakterystyki biegu jałowego przy pracy silnikowej: wyznaczenie charakterystyk ;
- pomiar charakterystyk obciążenia silnika dla pełnego zakresu prędkości i momentów: wyznaczenie tablic parametrów mechanicznych, elektrycznych silnika i falownika;
- badania termiczne: szereg prób nagrzewania dla parametrów odpowiadających konkretnym punktom pracy silnika w napędzie samochodu elektrycznego oraz dla parametrów maksymalnych z ciągłą rejestracją parametrów elektromechanicznych oraz temperatur w poszczególnych kluczowych elementach konstrukcji silnika (uzwojenie, pakiet stojana, płaszcz wodny, magnesy itd.);

2.2. Opis stanowiska badawczego

Wymienione w programie badania zostały przeprowadzone na przygotowanym stanowisku badawczym, którego schemat poglądowy został przedstawiony na Rys. 2.



Rys. 2. Schemat ideowy stanowiska do badania parametrów silnika

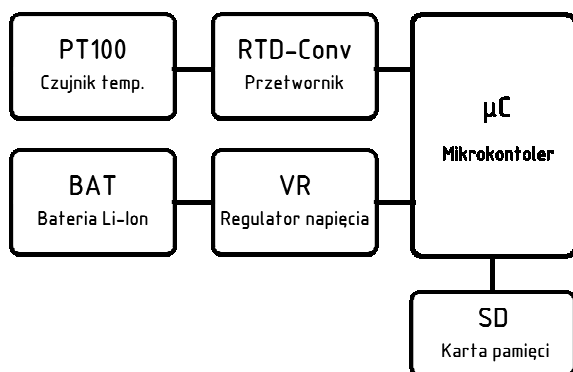
Badany silnik sprzęgnięto poprzez przetwornik momentu z pomocniczą maszyną prądu stałego. Badany obiekt zasilono ze sterownika Sevcon Gen4 Size8 (60kW mocy ciągłej, 100kW chwilowej) dedykowanego do napędów pojazdów elektrycznych. Podczas badań sterownik zasilano napięciem stałym o wartości znamionowej 360V. Jako niezbędny do pracy czujnik położenia kąтового wirnika zastosowano magnetyczny enkoder absolutny z wyjściem analogowym Sin-Cos. Sterowanie kontrolerem silnika zrealizowane zostało poprzez komputer kontrolno-pomiarowy z dedykowaną aplikacją.

Do pomiaru parametrów elektromechanicznych wykorzystano wysokiej klasy analizator mocy LEM D6000 wraz z przetwornikami prądowymi. Taki układ umożliwił pomiar napięć i prądów silnika (oraz wyznaczenie mocy czynnej i współczynnika mocy), napięcia i prądu pobieranego przez sterownik (oraz wyznaczenie mocy pobieranej przez cały napęd elektryczny) a także wielkości mechanicznych: momentu i prędkości. Na podstawie otrzymanych wyników dla każdego punktu statycznego wyznaczono sprawności silnika, sterownika oraz całego napędu elektrycznego). Archiwizacji mierzonych

parametrów dokonywano na komputerze kontrolno-pomiarowym przy wykorzystaniu własnej, dedykowanej aplikacji.

Badany silnik, jako obiekt prototypowy, został wyposażony w szereg rezystancyjnych czujników temperatury umieszczonych w strategicznych i najważniejszych pod kątem analizy termicznej miejscach, takich jak: uzwojenie w żłobku stojana oraz w części czołowej, pakiet stojana oraz płaszcz wodnego układu chłodzenia. Czujniki zostały podłączone do wielokanałowego rejestratora umożliwiającego archiwizację zmian temperatur w poszczególnych punktach.

W uwagi na fakt, że omawiany silnik charakteryzuje się wysokimi wartościami częstotliwości napięcia zasilającego zdecydowano się na pomiar temperatury magnesów umieszczonych w obracającym się zewnętrznym wirniku. W tym celu opracowano niewielkich rozmiarów bezprzewodowy rejestrator temperatury, który po zainstalowaniu na powierzchni części wirujących maszyny i podłączeniu czujnika umieszczonego na magnesie umożliwia ciągłą rejestrację temperatury. Schemat blokowy rejestratora przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy rejestratora temperatury magnesów w wirniku.

Głównym elementem układu jest mikrokontroler (μC) zasilany z baterii litowo-jonowej (BAT) poprzez regulator napięcia (VR). Rezystancja niewielkiego czujnika PT100 o budowie foliowej umieszczonego na magnesie wirnika konwertowana jest do postaci cyfrowej za pomocą przetwornika (RTD-Conv) i trafia do mikrokontrolera (μC), gdzie przeliczana jest na temperaturę.

Jako konwerter zastosowano dostępny na rynku moduł MAX31865 firmy Maxim Integrated charakteryzujący się 15-bitowym przetwornikiem ADC oraz maksymalnym błędem prze-

tworzenia $0,5^\circ\text{C}$. Wyniki temperatury rejestrowane są co określony czas na karcie microSD. Zastosowany mikrokontroler to niewielkich rozmiarów 32-bitowy moduł z rdzeniem ARM Cortex M0+. Charakteryzuje się on niewielkim poborem energii przy dobrych parametrach technicznych – z tego powodu jest on często wybierany do zastosowania w mobilnych urządzeniach elektronicznych m.in. według koncepcji Internetu Rzeczy. Opisany moduł pomiarowy wraz z baterią został zamocowany na części wału służącego do sprzęgnięcia z maszyną obciążającą. W celu ograniczenia zakłóceń mogących oddziaływać na układ, zastosowano taśmę ferrytową pomiędzy wałkiem i rejestratorem oraz wykonano wszystkie połączenia przewodami ekranowanymi (w szczególności przewód czujnika RTD). Zastosowanie niewielkiego akumulatora Li-Ion o pojemności 250mAh umożliwia przeprowadzenie wielogodzinnych prób z pomiarem temperatury magnesów bez konieczności ładowania.

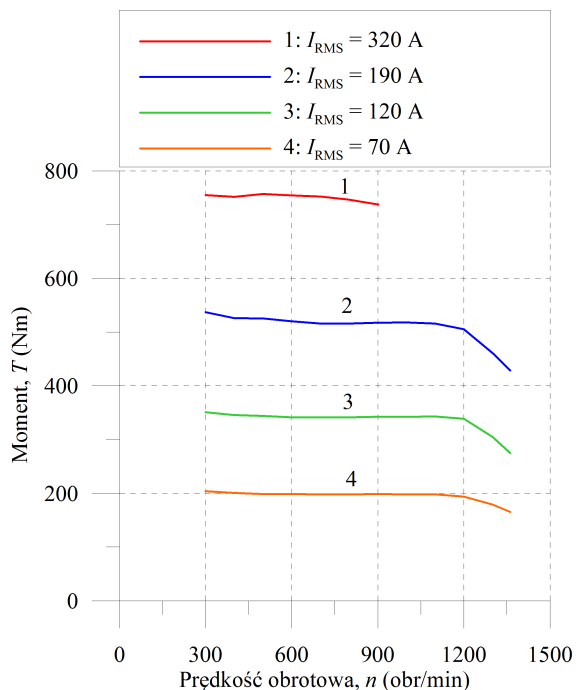
2.3. Wyniki pomiarów

Ze względu na obszerność zestawienia otrzymanych podczas badań wyników, ograniczono się do przedstawienia jedynie wybranych rezultatów.

W przypadku silników przeznaczonych do zastosowań w szeroko rozumianej elektromobilności, znaczącym parametrem silnika jest jego moment maksymalny i chwilowa przeciążalność (w celu zapewnienia dobrej dynamiki pojazdu).

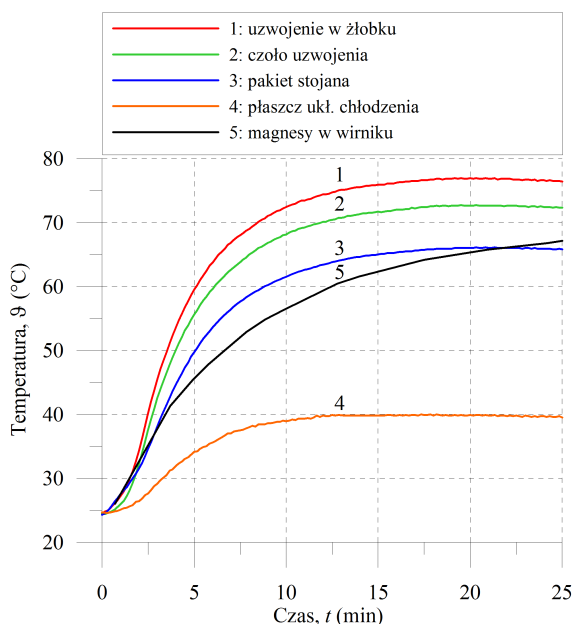
Na Rys. 4 przedstawiono rodzinę trzech charakterystyk elektromechanicznych silnika $T = f(n)$ dla $I = \{70, 120, 190, 320\}$ A. Do prędkości $n = 1200$ obr/min silnik cechuje się praktycznie stałym stosunkiem momentu i prądu. Powyżej tej prędkości napęd przechodzi do pracy w drugiej strefie sterowania osłabiając strumień od magnesów w wirniku.

Z punktu widzenia zastosowania silników elektrycznych w kołach pojazdu poza wymienionymi powyżej wymaganiami będą one wpływać na komfort jazdy poprzez zwiększenie mas nieresorowanych. Badania wpływu umieszczenia silników elektrycznych w kołach pojazdu przeprowadzono w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej [8].



Rys. 4. Charakterystyki elektromechaniczne silnika.

Na Rys. 5 przedstawiono czasowe przebiegi zmian temperatur w poszczególnych punktach silnika podczas pracy z prędkości $n = 950$ obr/min i obciążony mocą $P_2 = 30$ kW i chłodzony wodą o przepływie 10 dm³/min.



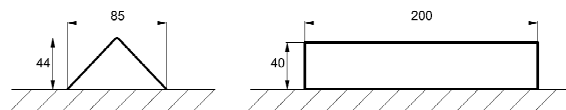
Rys. 5. Przebieg czasowy temperatur w poszczególnych punktach silnika podczas próby nagrzewania: $n = 950$ obr/min, $P_2 = 30$ kW.

Jak można zauważyć, silnik cechuje się krótką cieplną stałą czasową – temperatura stojana w kadłubie już po 25 minutach praktycznie się

nie zmienia. Temperatura czoła uzwojenia dzięki zastosowaniu specjalnych rozwiązań jest niższa niż uzwojenia w żłobku.

3. Badania wpływu zamontowanych silników elektrycznych w kołach pojazdu na komfort jazdy

Podczas badań doświadczalnych mierzono pionowy ruch tylnego zawieszenia pojazdu podczas pokonywania pojedynczej przeszkody na drodze o relatywnie dużej wysokości. Wybrane nierówności odpowiadają przypadkom przejeżdżania przez tory kolejowe, wgłębienia na drodze lub leżące na niej niewielkie przedmioty. Pomiary polegały na przejeżdżaniu przez nierówności drogi o różnych kształtach. Przejazd wykonywano przy symetrycznym lub niesymetrycznym najeżdżaniu na nierówności drogi. W badaniach wykorzystano dwie różne przeszkody, jedną o trójkątnym kształcie, generującą ruch koła w górę, a następnie w dół oraz drugą, prostokątną, w której pionowe ruchy koła są rozdzielone (Rys. 6). W badaniach zastosowano kątownik $L50$, co odpowiada najeżdżaniu na nierówność o wysokości 44 mm o długości podstawy 85 mm oraz nierówność o kształcie prostokątnym 40 mm \times 200 mm. Na przeszkodę najeżdżano z prędkością 12.5 km/h.



Rys. 6. Profile nierówności stosowane podczas badań

Do badań wykorzystano samochód osobowy klasy B o masie całkowitej ~ 1220 kg (pełne obciążenie), a w przypadku obciążenia kierowcą i aparaturą badawczą 1100 kg.

Testy przeprowadzono w dwóch konfiguracjach masowych: pojazd standardowy i dodatkowe masy symulujące obecność silników elektrycznych. Zamontowanie dodatkowych mas symulujących silniki w kołach powodowało zwiększenie masy całkowitej pojazdu o 70 kg (Rys. 7). Masy te odpowiadają masie wirnika i stojana silników elektrycznych. Założono, że sztywność sprężyny zawieszenia i współczynnik tłumienia amortyzatora są takie same dla obu konfiguracji. Parametry te dalej wykorzystywano podczas walidacji modelu symulacyjnego tylnego zawieszenia.



Rys. 7. Widok masy zastępczej imitującej wirnik silnika

W pojeździe zamontowano aparaturę pomiarową pozwalającą na rejestrowanie: odległości osi koła od jezdni, ugięcia zawieszenia, przyspieszeń działających na oś koła oraz na nadwozie pojazdu bezpośrednio nad osią koła i prędkości jazdy (Rys. 8 i 9).



Rys. 8. Obiekt badań z zamontowaną aparaturą pomiarową podczas pokonywania nierówności jezdni przez koło

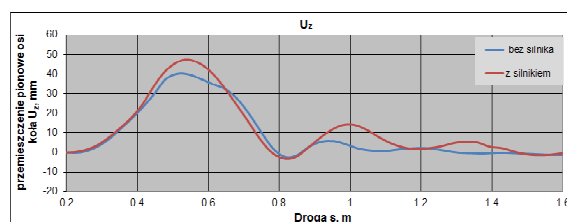
Wyniki pomiarów były zapisywane z częstotliwością 100Hz na dysku aparatury pomiarowej.



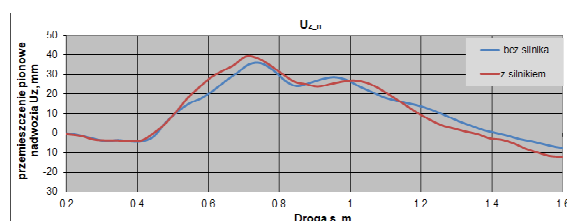
Rys. 9. Czujnik przyspieszenia zamontowany na nadwoziu pojazdu nad kołem

Ciśnienie w oponach było zgodne z zaleceniami producenta pojazdu i było takie same w obu przypadkach, z masami symulującymi silniki elektryczne w kołach i bez nich. Nawierzchnia drogi była sucha i czysta.

Na Rys. 10 i 11 przedstawiono wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych osi koła i nadwozia, mierzone bezpośrednio nad osią koła, podczas pokonywania nierówności prostokątnej (deska o wymiarach 40mm x 200mm) dla pojazdu z i bez silników elektrycznych w kołach.



Rys. 10. Porównanie przemieszczeń pionowych osi koła podczas przejazdu przez nierówność prostokątną („deska”) pojazdu z silnikami w kołach i bez nich



Rys. 11. Porównanie przemieszczeń pionowych nadwozia nad kołem podczas przejazdu przez nierówność prostokątną („deska”) pojazdu z silnikami w kołach i bez nich

4. Podsumowanie

Opracowane stanowisko badawcze pozwala na przeprowadzenie prób silnika trakcyjnego do zabudowy w piastach kół samochodów w pełnym zakresie obciążeniowym oraz prędkościowym. Jednymi z najistotniejszych badań są próby nagrzewania, które pozwalają na określenie czasu, w jakim silnik może pracować z danymi parametrami są próby nagrzewania. Takie badania pozwalają określić jakie temperatury pracy występują w poszczególnych, kluczowych elementach silnika w trakcie różnych warunków jazdy samochodu np. podczas jazdy z prędkością maksymalną, podczas przyspieszania czy jazdy po nachyleniu. Istotnym pomiarem w silnikach wielobiegowych do zabudowy w piaście czół jest również pomiar temperatury magnesów trwałych. Magnesy neodymowe posiadają dopuszczalny zakres

temperatury pracy, którego przekroczenie może spowodować rozmagnesowanie magnesów. Z tego powodu w pewnych punktach pracy to właśnie temperatura magnesów trwałych może stanowić ograniczenie zakresu pracy silnika a nie temperatura uzwojenia [9]. Projektowanie i badanie silnika do zabudowy w piaście koła powinny być poprzedzone badaniami w zakresie wpływu zastosowania dodatkowej masy nieresorowanej na komfort jazdy oraz pracę układu zawieszenia. Badania na pojeździe powinny pozwolić na określenie maksymalnej masy, jaką może stanowić silnik, co ma znaczący wpływ na jego konstrukcję.

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

5. Literatura

- [1]. E. Król, J. Bernatt: "Optimum selection of electrical motor for urban bus drive", Proc. of International Conference on Advanced Automotive Technology (ICAT), Gwangju, Korea, 2018.
- [2]. B. Będkowski, W. Radwański: "Obliczenia trakcyjne pojazdu sportowo-rekreacyjnego UTV", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 3, 105-108, 2012.
- [3]. B. Będkowski, A. Białas, W. Radwański, R. Rossa: "Koncepcja napędu elektrycznego "E-KIT" dla miejskich samochodów osobowych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 4, 95-100, 2012.
- [4]. www.komel.katowice.pl/elektromobilnosc.html.
- [5]. <http://e-bus.rafako.com.pl>.
- [6]. S. Sieradzki, D. Kardas: "Projektowanie i wytwarzanie maszyn elektrycznych i transformatorów – nowe obszary prac badawczych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 83, 25-32, 2009.
- [7]. P. Dukalski, B. Będkowski, T. Wolnik, A. Urbaś, K. Augustynek: "Założenia projektu silnika do zabudowy w piaście koła samochodu elektrycznego", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 114, 263-272, 2017.
- [8]. P. Dukalski, B. Będkowski, K. Parczewski, H. Wnęk, A. Urbaś, K. Augustynek: "Dynamics of the vehicle rear suspension system with electric motors mounted in wheels" *Maintenance and Reliability*, 21(1), 2019.
- [9]. P. Dukalski, B. Będkowski, T. Wolnik, T. Jarek: "The Efficiency Analysis of Various Structural Solutions of the Wheel Motor Cooling Systems", Proc. of XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018.

Autorzy

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

dr hab. inż. Krzysztof Parczewski, prof. ATH
 dr inż. Henryk Wnęk
 [kparczewski, hwnek]@ath.bielsko.pl
 Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów
 Akademia Techniczno-Humanistyczna
 w Bielsku-Białej

dr inż. Andrzej Urbaś
 dr inż. Krzysztof Augustynek
 [aurbas, kaugustynek]@ath.bielsko.pl
 Katedra Podstaw Budowy Maszyn
 Akademia Techniczno-Humanistyczna
 w Bielsku-Białej