

Piotr DUKALSKI, Bartłomiej BĘDKOWSKI, Tomasz WOLNIK, Tomasz JAREK

ZAŁOŻENIA PROJEKTU SILNIKA DO ZABUDOWY W PIAŚCIE KOŁA SAMOCHODU ELEKTRYCZNEGO

Artykuł przedstawia koncepcję projektu silnika do zabudowy w piaście koła samochodu elektrycznego. Autorzy przedstawili wady i zalety napędu bezpośredniego oraz możliwe aplikacje tego typu rozwiązania. W publikacji zostały przedstawione wyniki wstępnych obliczeń projektowych obwodu elektromagnetycznego, modelu termicznego stojana oraz konstrukcji mechanicznej silnika.

WSTĘP

Wraz ze wzrostem zainteresowania i sprzedażą samochodów elektrycznych rozwijane są różne kierunki techniki związanej bezpośrednio lub mającej wpływ na szeroko pojętą elektromobilność [1, 2]. Badania oraz wdrożenia w zakresie napędów pojazdów elektrycznych dotyczą między innymi źródeł zasilania, systemów sterowania, systemów zasilania baterii, techniki przesyłu energii i samych silników napędowych [3, 4, 5, 6, 7, 8]. W ostatnich latach, jednym z najbardziej rozpoznawalnych nurtów w dziedzinie trakcyjnych silników elektrycznych są silniki do zabudowy w piaście koła napędowego [9]. Rozwiązanie to po raz pierwszy wykorzystał, na początku XX wieku Ferdinand Porsche do stworzenia pierwszego na świecie samochodu hybrydowego [10]. Rozwiązanie nie sprostało konkurencji dynamicznie rozwijającego się rynku samochodów spaliny-
wych.

Po ponad 100 latach, wraz z rozwojem techniki koncepcja napędu z silnikami w kołach napędowych znowu cieszy się dużym zainteresowaniem [11].

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.

Należy zwrócić uwagę, że silniki zabudowane w piastach kół mogą również pełnić funkcje wspomagające napęd innego typu, w tym również spalinowy np. podczas ruszania, gdy wymagane są od napędu największe wartości momentu obrotowego lub podczas wykonywania manewrów, zwiększając dynamikę jazdy.

Uwzględniając liczne zapytania ze strony przedsiębiorców oraz wyniki obserwacji rynku pojazdów elektrycznych można zauważyć, że koncepcja napędu bezpośredniego nie ogranicza się jedynie do aplikacji w typowych pojazdach drogowych (samochody i motory). Zalety tego typu rozwiązania kwalifikują je również do zastosowania w wielu innych aplikacjach, takich jak: przemysłowe pojazdy transportowe i pojazdy serwisowe stosowane w dużych fabrykach, magazynach, kopalniach czy lotniskach, pojazdy rekreacyjne, takie jak wózki golfowe, quady, drony naziemne, pojazdy wojskowe, policyjne lub pożarnicze.

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.

1. GŁÓWNE ZALETY I WADY NAPĘDÓW BEZPOŚREDNICH, POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH

Większość układów napędowych pojazdów spalinowych, jakie można spotkać obecnie na rynku są konstruowane na bazie tej samej koncepcji od ok. 100 lat. Standardowy napęd składa się z:

- silnika
- sprzęgła głównego
- skrzyni biegów
- przekładni głównej z mechanizmem różnicowym
- półosi napędowych
- kół jezdnych

Podobną konstrukcją cechuje się większość proponowanych na rynku lub prezentowanych w różnych materiałach przeglądowych pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Przedstawiane układy napędowe zastępują "centralny" silnik spalinowy silnikiem elektrycznym [8].

Wraz z rozwojem techniki oraz technologii związanych z napędami i samymi silnikami elektrycznymi, producenci są w stanie osiągać coraz lepsze parametry eksploatacyjne napędów przy równoczesnym zachowaniu ich wysokiej sprawności energetycznej [12, 13, 14].

Jednym z głównych kierunków rozwoju napędów jest uzyskanie jak największego stosunku momentu obrotowego (maksymalnego i możliwego do osiągnięcia przy pracy długotrwałej) do objętości/masy (tzw. współczynnik gęstości mocy /momentu).

W taki trend bardzo dobrze wpisuje się koncepcja napędu bezpośredniego, która oferuje szereg zalet, w tym:

- wyeliminowanie przekładni mechanicznych, które oprócz zmniejszenia sprawności układu stanowią element, który wymaga konserwacji i może ulec uszkodzeniu,
- udostępnienie dodatkowego miejsca w samochodzie, które może posłużyć do zamontowania baterii zasilających,
- brak potrzeby pośrednich transmisji mocy przez półosie napędowe, mechanizmy różnicowe oraz inne, złożone mechanizmy,
- możliwość stosunkowo prostego zaimplementowania napędu na 2 lub 4 koła,
- efektywniejsze hamowanie rekuperacyjne (pominięcie spadku sprawności układu napędowego z uwagi na przełożenia),
- stosunkowo łatwy demontaż silnika podczas serwisu,

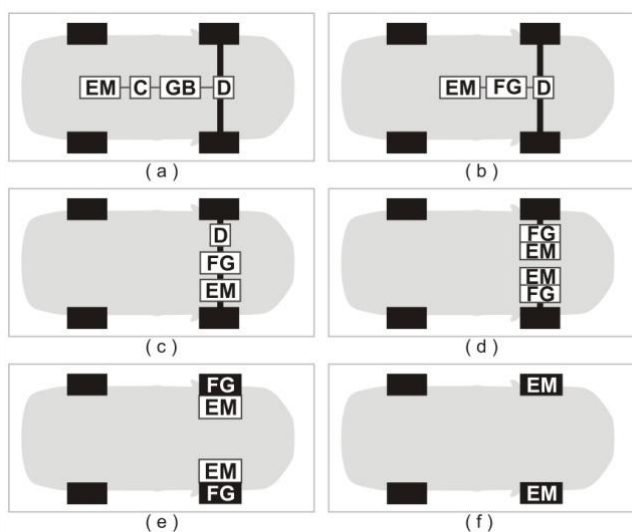
- lepsza sterowność pojazdem z uwagi na możliwość bezpośredniego zadawania momentu osobno na każde z kół.

Poza szeregiem wymienionych zalet rozwiązanie to posiada również pewne wady i ograniczenia:

- ograniczona przestrzeń, w której musi zmieścić się silnik,
- utrudnione chłodzenie silnika,
- dodatkowa masa nieresorowana, wynikająca z masy zamontowanych w kołach silników,
- konstrukcja w niektórych zastosowaniach bardziej skomplikowana pod względem uszczelnienia/zachowania wysokiego IP.

Maksymalny oraz znamionowy moment obrotowy może być mniejszy niż w rozwiązaniach klasycznych z przekładnią

Na rysunku 1 przedstawiono schematy różnych układów napędowych stosowanych obecnie w pojazdach elektrycznych. Rysunek 1f przedstawia układ, który jest rozpatrywany w projekcie realizowanym przez Instytut KOMEL.



Rys. 1. Różne konfiguracje napędów pojazdów elektrycznych. EM – silnik elektryczny, FG – stała przekładnia, C – sprzęgło, GB – skrzynia biegów, D – mechanizm różnicowy.

2. KONSTRUKCJA SILNIKA

Zaprojektowany silnik do zabudowy w piaście koła samochodu elektrycznego jest silnikiem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi, z wirnikiem zewnętrznym. Część stała tzw. stojan jest zbudowany z rdzenia magnetycznego z nawiniętym uzwojeniem silnika, które jest zasilane. Wirnik silnika stanowi wirujący kadłub, w którym jest wbudowany rdzeń magnetyczny z magnesami trwałymi.

Rozwiązanie silnika przystosowanego do zabudowy w piaście koła pojazdu elektrycznego wymaga kompleksowego podejścia uwzględniającego: parametry eksploatacyjne, gwarantujące stabilną i dynamiczną pracę, możliwości układu chłodzenia, ograniczenie przestrzenne i dopuszczalną masę silnika, która jest masą nieresorowaną, mającą wpływ na komfort i bezpieczeństwo jazdy.

Dostępna dla konstruktora silnika przestrzeń jest ograniczona średnicą zewnętrzną, kształtem felgi, osadzeniem felgi (ET) oraz bębnem hamulcowym (jeżeli jest uwzględniony w układzie hamulcowym). W efekcie pozostała do wykorzystania objętość przyjmuje kształt toroidalny o stosunkowo dużej średnicy względem długości. Taki stosunek wymiarów pozwala na bardzo korzystne zagospodarowanie dostępnej przestrzeni obwodu silnika oraz uzyskanie wysokiego współczynnika gęstości momentu/masy.

Zaletą toroidalnego kształtu jest dodatkowa przestrzeń umożliwiająca zabudowę elementów silnika lub napędu np. enkodera czy układu hamulcowego.

Jednym z głównych problemów projektowania tego typu silników jest zapewnienie skutecznego odprowadzania ciepła z silnika. Głównym elementem silnika, generującym straty jest jego uzwojenie. W silnikach z wirnikami wewnętrznymi odprowadzenie ciepła odbywa się przez kadłub. W silnikach z wirnikiem zewnętrznym kadłub pozwala odprowadzić ciepło z wirnika.

W opisywanym rozwiązaniu ciepło jest odprowadzane poprzez labiryntowy układ chłodzenia, w którym jest wymuszony przepływ chłodziwa.

Labirynt znajduje się w konstrukcji wsporczej, na której osadzony jest stojan silnika. Przestrzeń pomiędzy stojanem uzwojeniem a układem chłodzenia jest wypełniona specjalnie dobraną żywicą epoksydową w celu zwiększenia efektywności odbioru ciepła z czoł uzwojenia.

Projekt silnika, zakłada jego montaż w feldzie o średnicy 17". Jako aplikację testową wybrano samochód Fiat Panda. Parametry silnika zostały tak dobrane aby samochód z zamontowanymi dwoma silnikami napędowymi był w stanie osiągnąć odpowiednio duże przyspieszenie oraz prędkość maksymalną nie mniejszą niż 150 km/h.



a)



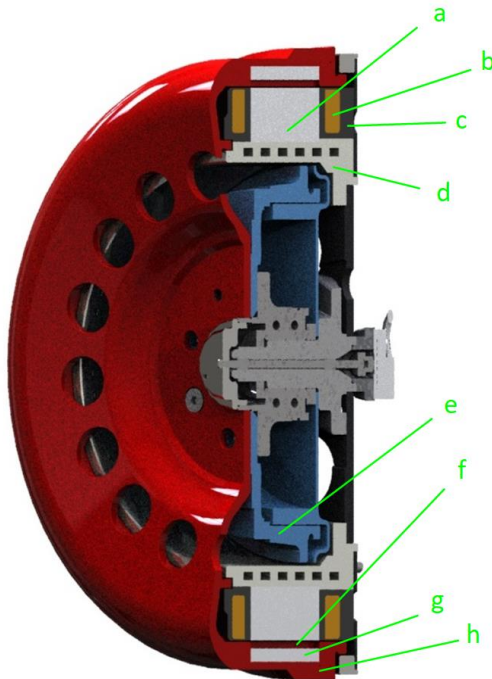
b)



c)

Rys. 2. Model 3D zamontowanego silnika a) silnik bez felgi b) silnik z zamontowaną felgą oraz oponą c) silnik z zamontowaną felgą oraz oponą - widok od strony zasilania

W przypadku samochodów o większej masie można zastosować napęd na 4 koła lub więcej w przypadku np. autobusów. Ponieważ parametry pracy silnika oprócz aspektów związanych z optymalizacją jego konstrukcji zależą również od wymiarów gabarytowych głównie średnicy zewnętrznej i długości rdzenia magnetycznego, w pojazdach większych dostępna przestrzeń projektowa pozwala na opracowanie silników o znacznie wyższych parametrach pracy (np. wyższym momencie obrotowym).



Rys. 3. Model 3D przekroju silnika a) rdzeń magnetyczny stojana b) czoła uzwojenia c) obszar wypełniony żywicą termoprzewodzącą d) konstrukcja wsporcza stojana z labiryntem przepływu chłodziwa e) bęben hamulcowy f) magnesy trwałe g) rdzeń magnetyczny wirnika h) wirujący korpus silnika (wirnik)

3. PARAMETRY PRACY SILNIKA

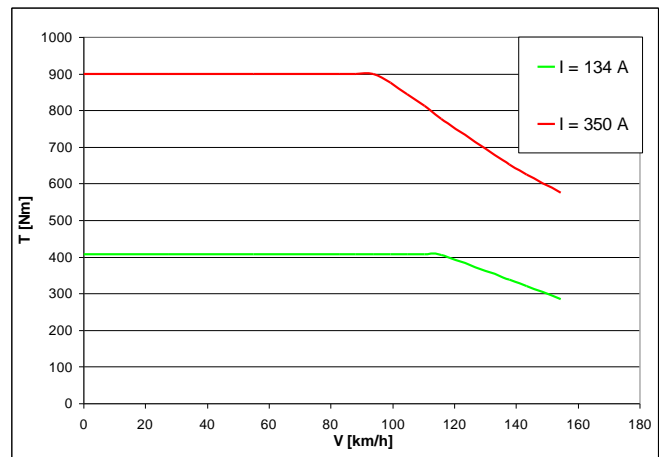
Obliczone Charakterystyki momentu obrotowego jednego silnika w funkcji prędkości samochodu zostały przedstawione na rysunku 4.

Charakterystyki zostały przedstawione dla dwóch wartości prądu zasilającego 134 A i 350 A.

Prąd o wartości 134 A jest prądem znamionowym natomiast 350 A jest założonym prądem maksymalnym jakim może zasilać silnik wybrany falownik.

Należy zwrócić uwagę, że w przypadku rozważanego napędu na dwa koła samochodu dostępny moment jest sumą momentów dwóch silników. W przypadku najbardziej korzystnym maksymalny moment dla takiego napędu będzie równy 1800 N·m w zakresie prędkości samochodu od 0 do 90 km/h, podobnie moment znamionowy do prędkości pk. 120 km/h będzie wynosił 800 N·m.

O ile maksymalny moment obrotowy ma bezpośredni wpływ na maksymalne przyspieszenie o tyle moment znamionowy może stanowić pewną informację o przeciążalności termicznej silnika, ponieważ znamionowy moment obrotowy, generowany przez dwa silniki jest znacznie wyższy niż wymagany moment obrotowy dla samochodu jadącego po płaskiej drodze.



Rys. 4. Obliczone charakterystyki momentu obrotowego w funkcji prędkości jazdy samochodu.

Dla masy samochodu równej 1600 kg przeprowadzono obliczenia wymaganych parametrów pracy silnika dla przykładowych warunków jazdy.

Pierwszy zestaw parametrów odpowiada jeździe samochodu z prędkością 150 km/h. Wymagany moment obrotowy jaki musi generować każdy z silników, wynikający z oporów ruchu samochodu Fiat Panda wynosi 150 Nm. Z charakterystyki przedstawionej na rysunku 4 wynika, że silnik przy tej prędkości samochodu jest w stanie generować przy zasilaniu znamionowym prądem dwukrotnie wyższy moment, równy 300 N·m.

Innym przykładem pracy silnika jest sytuacja gdy samochód wjeżdża po drodze o nachyleniu 15% z prędkością 50 km/h. W tym przypadku każdy z silników musi generować wyższy moment obrotowy (496 N·m) niż moment znamionowy (400 N·m). Jazda po tak dużym nachyleniu nie stanowi dla silnika wymogu generowania wymaganego momentu obrotowego w reżimie S1 natomiast jest istotne aby silnik mógł dysponować takim momentem obrotowym, przy danej prędkości pojazdu przy jednoczesnym zapasie termicznym silnika.

Tab. 1 Obliczone parametry silnika w wybranych punktach pracy silnika

	Parametry Znamionowe	V=150km/h $\alpha_s=0\%$	V=50km/h $\alpha_s=15\%$
U	200	200	105
I	134	90	165
P	42	21,4	23,6
T	400	150	496
n	1000	1362	454

Charakterystyki rozwijanego momentu obrotowego przedstawione na rysunku 4 spełniają wszystkie wskazane warunki pracy.

Należy jednak zwrócić uwagę, że oprócz uzyskiwanego momentu obrotowego w danym zakresie prędkości istotny jest również czas, przez jaki silnik może pracować w danym punkcie pracy.

W tym celu zostały przeprowadzone symulacje pracy na modelach do obliczeń termicznych.

Obliczone straty w elementach silnika w poszczególnych punktach pracy zostały zadane w obliczeniach termicznych.

Głównymi miejscami, w których generowane są straty w silniku elektrycznym są:

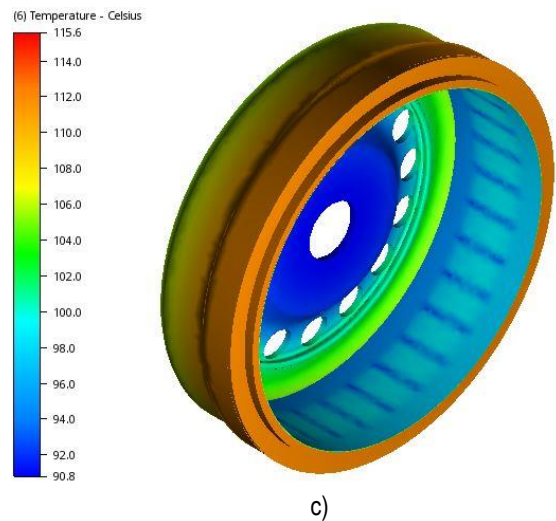
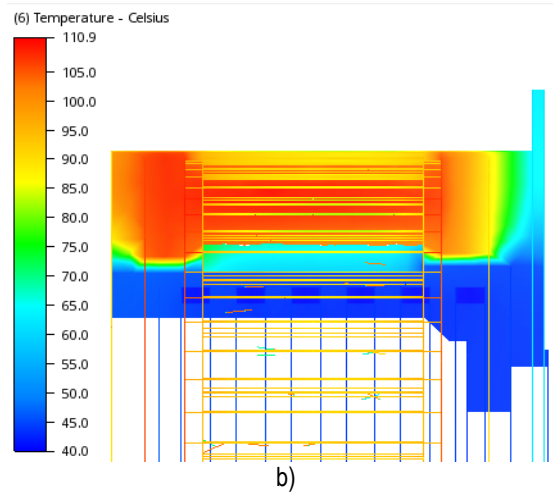
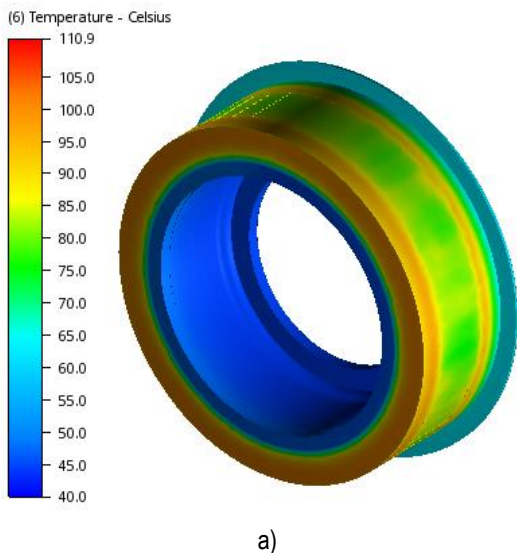
- straty w uzwojeniu stojana, które pochodzą od rezystancji uzwojenia i są proporcjonalne do drugiej potęgi prądu zasilającego silnik;
- straty w rdzeniu magnetycznym występujące ze względu na histerezowe przemagnesowywanie blach, z których wykonany jest pakiet rdzenia, z uwagi na generowane prądy wirowe oraz wpływ zmiany gęstości strumienia magnetycznego w zębach, na które ma wpływ odkształcanie się pola magnetycznego pod wpływem reakcji twornika.

W silnikach wielobiegunowych pracujących z wysoką częstotliwością zasilania należy dodatkowo uwzględnić straty w magnesach.

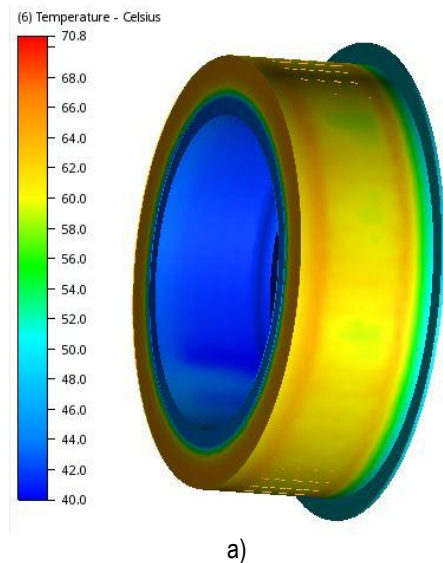
Generowane w magnesach straty są stosunkowo małe i nie mają znaczącego wpływu na temperaturę pracy uzwojenia, które w standardowych silnikach elektrycznych determinują obciążenie temperaturowe silnika, natomiast istotne jest miejsce ich generowania oraz ich wpływ na temperaturę pracy magnesów, która nie powinna przekraczać 120-150 °C z uwagi na możliwość ich rozmagnesowania termicznego.

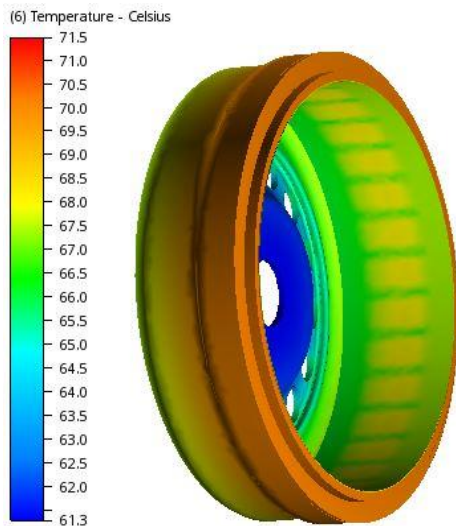
W tabeli 2 zostały przedstawione obliczone straty dla poszczególnych punktów pracy silnika, które zostały zaimplementowane w modelach termicznych.

Obliczenia dla pracy w punkcie znamionowym zakładały pracę S1 do ustalenia się temperatur w modelu obliczeniowym. Takie samo założenie zostało przyjęte dla pracy silnika przy prędkości pojazdu 150 km/h i nachyleniu drogi 0%. Dla pracy silnika przy jeździe samochodu z prędkością 50 km/h po drodze o nachyleniu 15% założono przykładowy czas jazdy równy 4.5 min ($S = 5\text{km}$). Dla pierwszych dwóch punktów pracy liczonych do ustalenia temperatury w reżimie S1 przyjęto temp początkową silnika równą temp. otoczenia 40 °C. Dla pracy silnika przy podjeździe założono temperatury początkowe silnika obliczone po ustaleniu się przy pracy S1 i $V=150\text{ km/h}$.



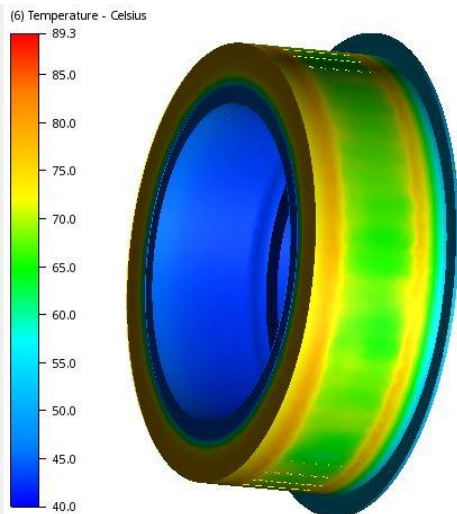
Rys. 5. Obliczony rozkład temperatur dla pracy S1 silnika dla warunków znamionowych i przepływie chłodziwa 15 l/min. a) stojan, b) przekrój wzdłużny stojana c) wirnik



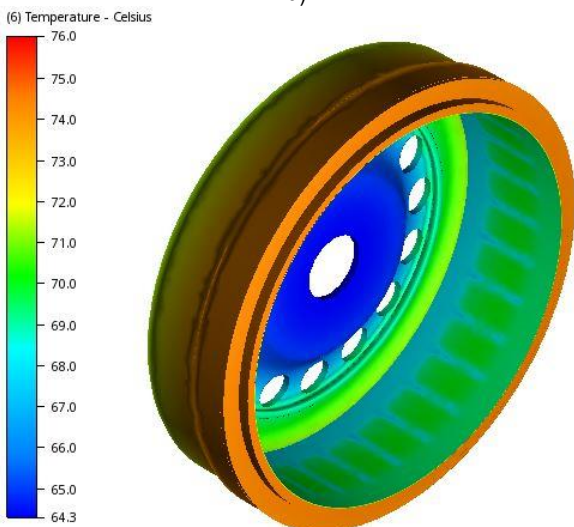


b)

Rys. 6. Obliczony rozkład temperatur dla pracy silnika S1, przy prędkości samochodu 150 km/h, po drodze o nachyleniu powierzchni 0% i przepływie chłodziwa 15 l/min. a) stojan, b) wirnik



a)



Rys. 7. Obliczony rozkład temperatur dla pracy silnika przy prędkości samochodu 50 km/h, po drodze o nachyleniu powierzchni 15% i przepływie chłodziwa 15 l/min. oraz temperaturami początkowymi jak na rys. 6 a) stojan, b) wirnik

W tabeli 2 zostały przedstawione obliczone maksymalne temperatury w stojanie oraz wirniku silnika dla trzech rozpatrywanych parametrów jazdy samochodu.

Podobne analizy można przeprowadzić dla innych parametrów jazdy samochodu różniących się kątem nachylenia drogi, prędkością jazdy samochodu, wagą pojazdu czy różnym układem napędowym np. z zastosowaniem czterech silników i napędem na 4 koła.

Tab. 2 Obliczone temperatury

	Obliczona temperatura [°C]	
	stojan uzwojenie	wirnik ma- gnesy
Par. znamionowe	111	115,6
V=150km/h $\alpha_s=0\%$	71	71,5
V=50km/h $\alpha_s=15\%$	89,3	76

PODSUMOWANIE

W artykule została przedstawiona konstrukcja silnika, przeznaczonego do zabudowy w piaście koła samochodu elektrycznego.

Przedstawione modele 3D stanowią podstawę, na której została oparta dokumentacja wykonawcza silnika.

Zaprezentowany model przekroju pokazuje również w jaki sposób został rozwiązany układ chłodzenia silnika.

Autorzy przedstawili koncepcję układu napędowego samochodu

z zabudowanymi dwoma silnikami. Na podstawie symulacji pracy napędu w samochodzie Fiat Panda przedstawili analizę termiczną dla trzech różnych parametrów pracy silnika: dla pracy S1 w punkcie znamionowym, który jest punktem abstrakcyjnym z uwagi na brak stałego zapotrzebowania na tak wysoki moment obrotowy w nieograniczonym czasie, dla jazdy samochodu ze stałą prędkością 150 km/h oraz dla podjazdu o długości 5 km, po nachyleniu 15% z prędkością 50 km/h przy założeniu początkowego stanu termicznego wynikającego z ustalonej temperatury jazdy z prędkością 150 km/h.

Podobne analizy można przeprowadzać dla różnych parametrów pracy silnika, zamontowanego w różnych układach napędowych oraz dla pracy w różnych znormalizowanych cyklach jazdy samochodu.

Układ napędowy z silnikami zabudowanymi w piastach kół posiada wiele zalet związanych z eliminacją z układu przeniesienia momentu pomiędzy silnikiem a kołem, wielu skomplikowanych podzespołów. Inną zaletą może być efektywniejszy odzysk energii przy hamowaniu rekuperacyjnym lub dynamiczne sterowanie momentem każdego koła pojazdu.

W przypadku samochodów elektrycznych należy pamiętać o konieczności zabudowy baterii zasilającej co w przypadku zastosowania silników w piastach kół jest ułatwione z uwagi na zwolnienie miejsca w przestrzeni zabudowy standardowo silników centralnych.

Inną zaletą omawianego układu napędowego jest możliwość rozbudowy układu z napędem na dwa koła, na napędy wielokolowe oraz zastosowanie silników w napędach hybrydowych.

Silnik do zabudowy w piaście koła samochodu osobowego oprócz odpowiednio wysokich parametrów musi zapewniać skuteczne odprowadzenie ciepła co jest utrudnione w przypadku silników z wirnikiem zewnętrznym. Z tego powodu na etapie projektowania silnika należy zwrócić szczególną uwagę na rozkład strat mocy nie tylko z uwagi na sprawność silnika ale również generowanych przez nie temperatur, zarówno w stojanie jak i w wirniku oraz w magnesach.

BIBLIOGRAFIA

1. Global EV Outlook 2016 Beyond one million electric cars IEA(International Energy Agency), May 2016
2. Mobility Model, April 2016 version (database and simulation model), www.iea.org/etp/etpmodel/transport
3. E. Król *Silniki Elektryczne w Napędach Pojazdów Sportowo-Rekreacyjnych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 2/2014 (102)
4. E. Król, R. Rossa *Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi jako napęd pojazdu hybrydowego*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 4/2012 (97)
5. W. Radwański, B. Będkowski, A. Białas, R. Rossa; *Koncepcja napędu elektrycznego „E-Kit” dla miejskich samochodów osobowych*. Zeszyty Problemowe -Maszyny Elektryczne, nr 4/2012 (97)
6. www.komel.katowice.pl/elektromobilnosc.html
7. <https://solarisbus.com>
8. Bernatt J., Gawron S., Król E.: *Zastosowania trakcyjne nowoczesnych silników z magnesami trwałymi.*, Przegląd Elektrotechniczny” 12/2009
9. J. Thorton *Circular Precision Electric & Hybrid Vehicle Technology International*, lipiec 2013
10. E. Król; *Hamowanie odzyskowe, jako efektywny sposób zwiększenia zasięgu pojazdu hybrydowego*. Śląskie Wiadomości Elektryczne 2013
11. <http://www.electricvehiclenews.com/2014/08/the-global-market-for-ev-traction.html>
12. Król E, Rossa R: *Silniki z magnesami trwałymi o dużej przeciętalności momentem*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 81/2009
13. Bernatt J: *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, ISBN 978-83-910585-9-6.
14. Rossa R., Król E. *Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 81/2009, str. 125-129

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

mgr inż. Tomasz Jarek
t.jarek@komel.katowice.pl
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.044

Data zgłoszenia: 2018.05.21 Data akceptacji: 2018.06.15