

mgr inż. Piotr Dukalski¹⁾, mgr inż. Jan Mikoś²⁾

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

dr hab. inż. Roman Krok, prof. PŚ³⁾

Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Mechatroniki

Projekt silnika elektrycznego do zabudowy w piaście koła dostawczego hybrydowego samochodu o masie 3,5 tony

Design of a wheel hub motor for a hybrid delivery van with a weight not exceeding 3.5 tons

W artykule autorzy zaprezentowali model silnika elektrycznego do zabudowy w piaście koła samochodu dostawczego o masie do 3,5 t. Przedstawiono wyniki symulacji pracy silnika w napędzie złożonym z dwóch silników zabudowanych w tylnej osi napędowej pojazdu. Symulacje zostały przeprowadzone dla założonego cyklu jazdy Artemis Urban, który odwzorowuje cykl miejski z uwzględnieniem przeciętnej dynamiki jazdy. Obliczenia zostały przeprowadzone w programie Ansys Motor-CAD, który pozwala na sprzężenie modelu elektromagnetycznego oraz modelu termicznego obwodu elektromagnetycznego silnika. Zaprezentowano wyniki obliczeń temperatury poszczególnych elementów oraz parametrów pracy silnika przy symulacji jazdy miejskiej.

Słowa kluczowe: silnik w piaście koła, silnik z magnesami trwałymi, samochód elektryczny, napęd elektryczny

In the article, the authors presented a model of an electric wheel hub motor of a delivery vehicle weighing up to 3.5 tons. The article presents the results of simulating the operation of the motor in a drive consisting of two motors, installed in the rear driving axle of the vehicle. The simulations were carried out for the assumed Artemis Urban driving cycle, which represents the urban cycle, taking into account the average driving dynamics. The calculations were carried out in the Ansys Motor-CAD program, which allows to perform calculations on coupled models of the electromagnetic and thermal circuit. The calculated operating temperatures of individual motor components and operating parameters during the simulation of urban driving are presented.

Keywords: wheel hub motor, permanent magnet motor, electric car, electric drive

Wstęp

W obecnych czasach dynamiczny rozwój elektromobilności stawia coraz większe wymagania w stosunku do napędów pojazdów, skutkujące poszukiwaniem nowych konstrukcji oraz topologii układów napędowych i ciągłym zwiększaniem osiągnięć. Powstaje wiele prac naukowych dotyczących rozwoju napędów elektrycznych dedykowanych do zastosowania w pojazdach elektrycznych [1-3]. Jednym z ciekawszych napędów elektrycznych jest rozwiązanie z silnikami elektrycznymi zabudowanymi w kołach pojazdu [4-14].

W Sieci Badawczej Łukasiewicz Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL jest realizowany projekt „Polskie rozwiązania napędu elektrycznego w kołach”. Celem projektu jest zaprojektowanie, wykonanie i przetestowanie w warunkach laboratoryjnych i drogowych napędu bezpośredniego z silnikami zabudowanymi w kołach samochodu elektrycznego. Testy zostaną przeprowadzone na zelektryfikowanym samochodzie o masie do 3,5 t Fiat Ducato. Projekt obejmuje opracowanie technologii wykonania silników oraz opracowanie układu sterowania dwoma silnikami.

Podstawowym celem pracy jest przygotowanie kompleksowej technologii umożliwiającej oferowanie napędów wykorzystujących silniki elektryczne montowane w kołach pojazdów elektrycznych. Napędy tego typu mogą znaleźć zastosowanie w wielu aplikacjach w różnych gałęziach przemysłu, jak np. samochody osobowe, autobusy, transportery górnicze, pojazdy bezzałogowe dla służb mundurowych oraz kosmiczne łaziki. Opracowywany w ramach projektu napęd z dwoma silnikami elektrycznymi zamontowanymi w tylnej osi samochodu ma współtworzyć z oryginalnym układem napędowym samochodu z silnikiem spalinowym napęd hybrydowy. Pojazd ma za zadanie poruszać się w strefie miejskiej z prędkością do 90 km/h przy wykorzystaniu jedynie elektrycznego układu napędowego, natomiast poza miastem układ dwóch silników elektrycznych ma jedynie wspomagać układ napędowy z silnikiem spalinowym.

Obliczenia projektowe

Silnik został zaprojektowany w środowisku programu Ansys Motor-CAD oraz Ansys Electronics. Obliczenia projektowe obwodu elektromagnetycznego zostały przeprowadzone w programie Motor-CAD, a następnie zweryfikowane w programie Ansys Electronics pod względem obliczanego momentu obrotowego oraz strat mocy generowanych w magnesach trwałych.

W tabeli 1 podano parametry znamionowe i wybrane parametry konstrukcyjne silnika.

¹⁾ piotr.dukalski@komel.lukasiewicz.gov.pl

²⁾ jan.mikoś@komel.lukasiewicz.gov.pl

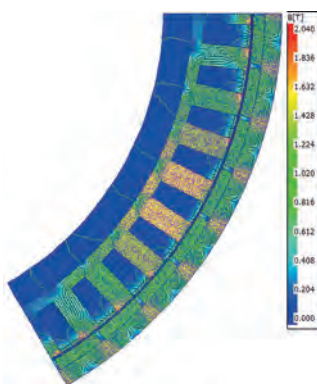
³⁾ roman.krok@polsl.pl

Tabela 1

Parametry znamionowe i konstrukcyjne silnika

Parametr	Wartość	Jednostka
P_m	29,3	kW
U_{DC} (falownika)	400	V
I_N	97,5	A
T_m	700	N·m
n_N	400	obr./min
T_{max}	2300	N·m
n_{max}	1200	obr./min
Q (liczba żłobków)	54	-
2p (liczba par biegunów magnetycznych)	48	-

Na rysunku 1 został przedstawiony model MES silnika z obliczonym rozkładem indukcji magnetycznej w rdzeniu magnetycznym, pochodzącym od magnesów trwałych.



Rys.1. Obliczony rozkład indukcji magnetycznej od magnesów trwałych silnika

Założono, że uzwojenie silnika jest uzwojeniem skupionym, nawijanym maszynowo. W ten sposób można znacząco zmniejszyć wysięg czoł, co pozwala na obniżenie strat mocy generowanych w uzwojeniu oraz ograniczenie masy obwodu elektroma-

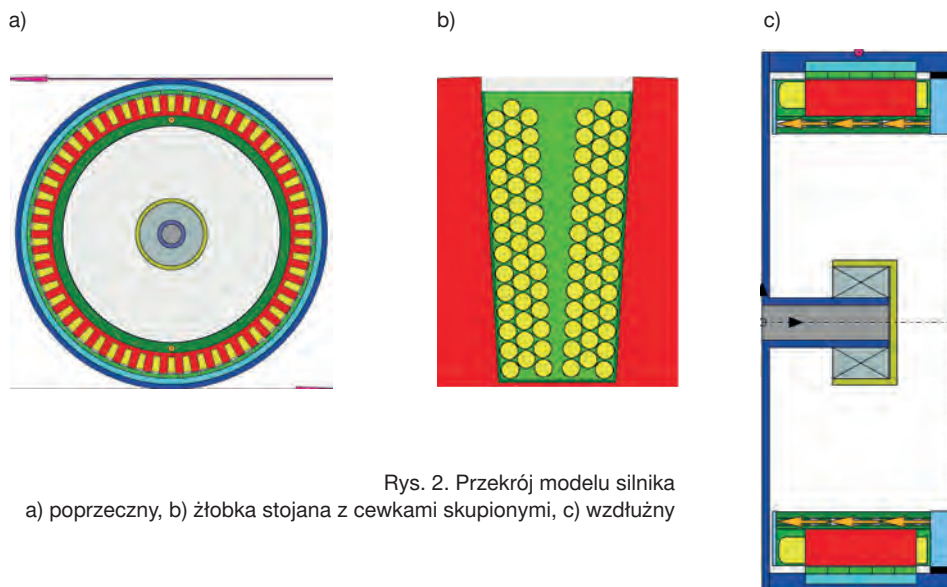
gnetycznego silnika. Alternatywą dla zmniejszenia masy obwodu elektromagnetycznego jest wydłużenie obwodu elektromagnetycznego i zwiększenie tym sposobem mocy silnika.

Na rysunku 2 został przedstawiony przekrój wzdłużny oraz poprzeczny modelu silnika oraz przekrój żłobka stojana. Przy zastosowaniu technologii uzwajania maszynowego można dokładnie zaplanować rozmieszczenie poszczególnych drutów cewki, a w konsekwencji uzyskać bardzo małą odległość pomiędzy poszczególnymi drutami nawojowymi (tzw. conductor separation).

Maszynowe uzwajanie cewek pozwala na uzyskanie dużego wypełnienia przestrzeni żłobka oraz bardzo dobre dopasowanie rozłożenia drutu nawojowego w cewce. Podczas uzwajania ręcznego, zwłaszcza w przypadku, gdy silnik jest uzwajany wiązką drutów równoległych, uzyskanie dużego wypełnienia żłobka jest ograniczone, ponieważ druty w żłobku układają się przypadkowo, ulegają skręcaniu i krzyżowaniu. Ma to również negatywny wpływ na stan cieplny silnika, gdyż przeplecenia powodują, że przestrzeń w żłobku pomiędzy cewką a rdzeniem magnetycznym stojana, stanowiącą drogę odprowadzania ciepła z uzwojenia do układu chłodzenia, jest miejscami wypełniona powietrzem, impregnatem lub/i żywicą epoksydową. Są to przestrzenie, których przewodność cieplna jest znacznie mniejsza niż przewodność cewki uzwojenia.

Na rysunku 3 została przedstawiona przykładowa cewka uzwojona automatycznie w Sieci Badawczej Łukasiewicz KOMEL. W projekcie założono, że uzwojenie silnika jest zalane żywicą epoksydową o przewodności cieplnej 1,3 W/mK, która ma za zadanie zwiększenie przepływu ciepła z czoł uzwojenia do układu chłodzenia oraz pomiędzy cewką a rdzeniem magnetycznym.

Magnesy trwałe zostały podzielone na 5 segmentów w celu zmniejszenia strat mocy generowanych w magnesach. Wytwarzane straty mocy w magnesach trwałych obniżają sprawność silnika oraz zwiększają ich temperaturę pracy, co powoduje pogorszenie ich parametrów, a w skrajnych przypadkach może prowadzić nawet do ich rozmagnesowania, zwłaszcza w drugiej strefie sterowania silnikiem z tzw. odzwbudaniem, gdy są pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego.



Rys. 2. Przekrój modelu silnika a) poprzeczny, b) żłobka stojana z cewkami skupionymi, c) wzdłużny



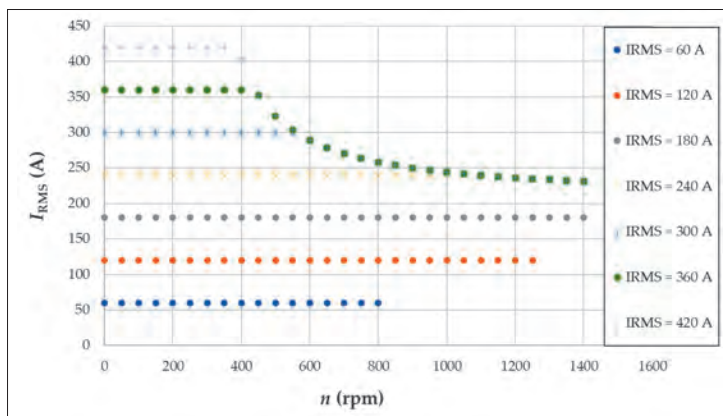
Rys. 3. Przykładowa cewka próbna uzwojona w Sieci Badawczej Łukasiewicz KOMEL

Na rysunkach 4-9 zostały przedstawione obliczone charakterystyki pracy silnika: momentu obrotowego, mocy mechanicznej, sprawności oraz strat mocy generowanych w uzwojeniu, w rdzeniu magnetycznym oraz w magnesach trwałych w funkcji prędkości obrotowej. Do obliczeń przyjęto trzy metody sterowania: MTPA, flux weakening oraz MTPV [15].

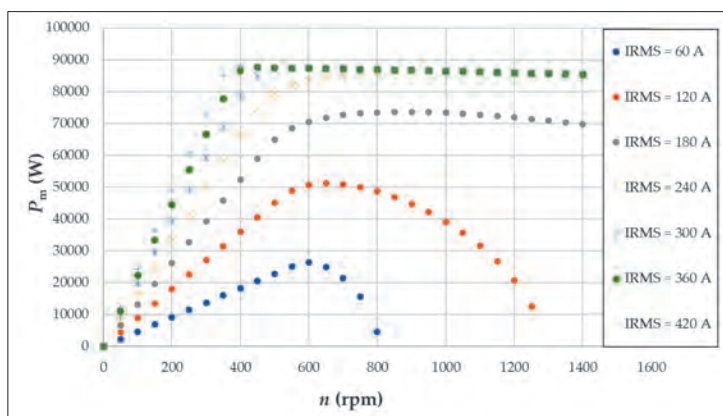
Na rysunkach 4 i 5 można zauważyć, że maksymalny prąd zasilania odpowiada maksymalnemu momentowi obrotowemu tylko w pierwszej strefie sterowania, tzn. do prędkości około 400 obr./min (sterowanie MTPA). W drugiej strefie sterowania maksymalną wartość momentu obrotowego można uzyskać przy mniejszym prądzie niż maksymalny (sterowanie MTPV), co korzystnie wpływa na sprawność silnika oraz ogranicza straty w uzwojeniu i magnesach trwałych (rys. 7-9). Moment obrotowy opada znacznie łagodniej niż jest to w przypadku sterowania flux weakening (rys. 8).

Dla wartości prądów zasilania od 60 do 240 A (rys. 6) występuje sterowanie flux weakening, gdzie przy stałej wartości prądu RMS zwiększa się udział prądu w osi d silnika, co skutkuje coraz większym osłabianiem strumienia od magnesów trwałych oraz zwiększa straty w maszynie. Skutkuje to prawie liniowym spadkiem momentu obrotowego; spadek momentu przy takim sterowaniu, przy coraz większych prędkościach obrotowych, jest dużo bardziej widoczny niż przy sterowaniu MTPV. Przy niedostatecznie dużych wartościach prądu RMS (prąd zasilania 60 A) niemożliwe jest osiągnięcie zadanej prędkości obrotowej przy jednoczesnym wytwarzaniu odpowiedniego momentu obrotowego, ze względu na zbyt dużą wartość składowej prądu w osi d w odniesieniu do składowej prądu w osi q silnika.

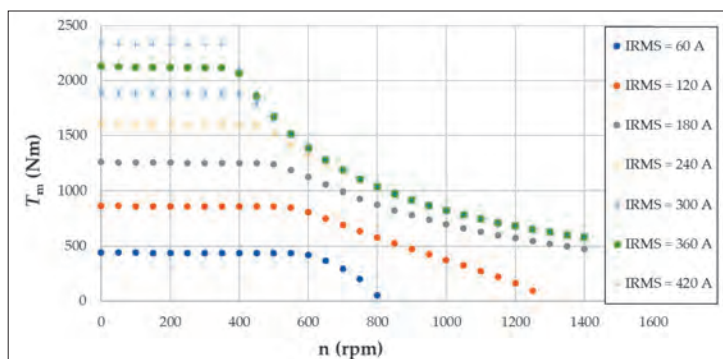
W celu weryfikacji obliczonych charakterystyk w module Lab programu Ansys Motor-CAD dodatkowo zostały przeprowadzone analizy w module E-magnetics oraz w programie Ansys Electronics. Weryfikacji poddano tylko jedną charakterystykę dla prądu $I_{RMS} = 420$ A.



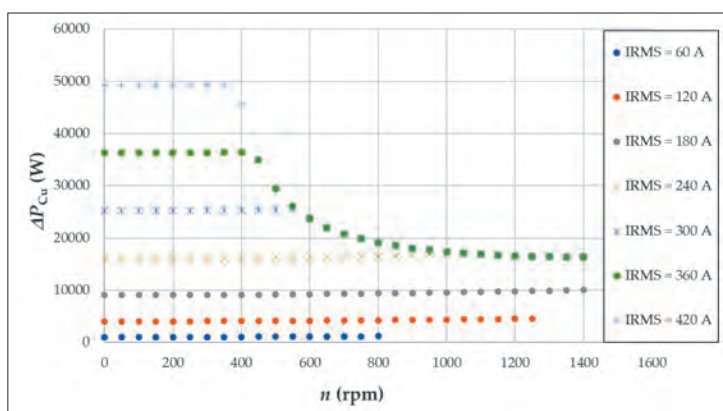
Rys. 4. Charakterystyki prądu zasilania w funkcji prędkości obrotowej obliczona dla kilku wartości prądu zasilającego



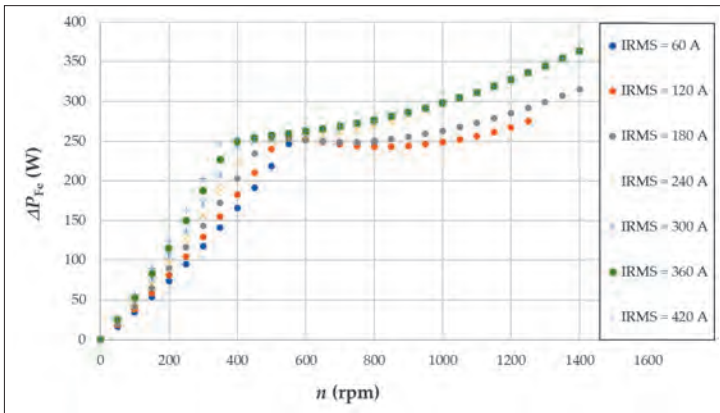
Rys. 5. Charakterystyki mocy mechanicznej w funkcji prędkości obrotowej obliczona dla kilku wartości prądu zasilającego



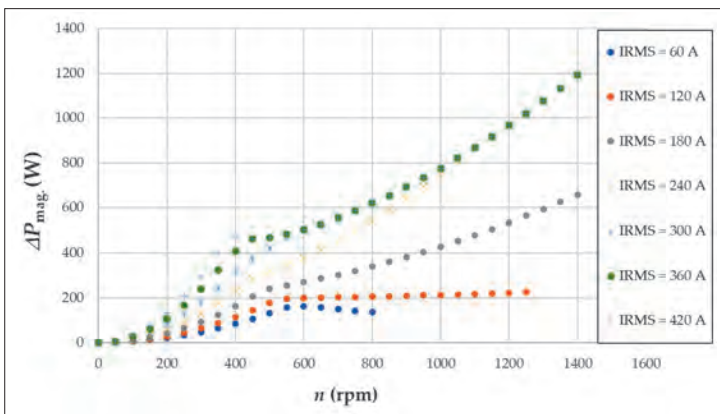
Rys. 6. Charakterystyki momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej obliczone dla kilku wartości prądu zasilającego



Rys. 7. Charakterystyki strat mocy w uzwojeniu silnika w funkcji prędkości obrotowej obliczone dla kilku wartości zasilającego prądu



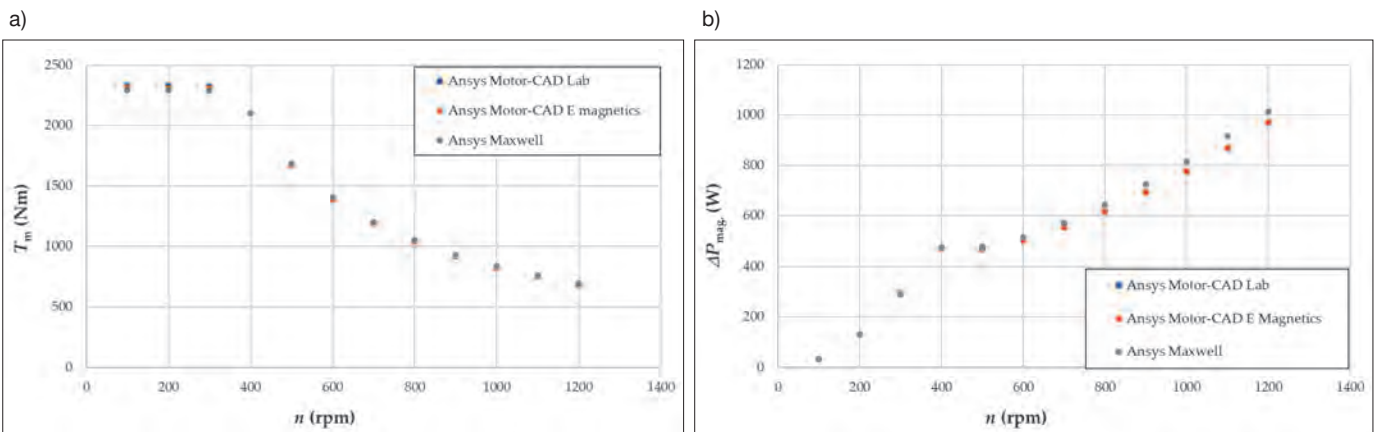
Rys. 8. Charakterystyki strat mocy w rdzeniu magnetycznym w funkcji prędkości obrotowej obliczone dla kilku wartości zasilającego prądu



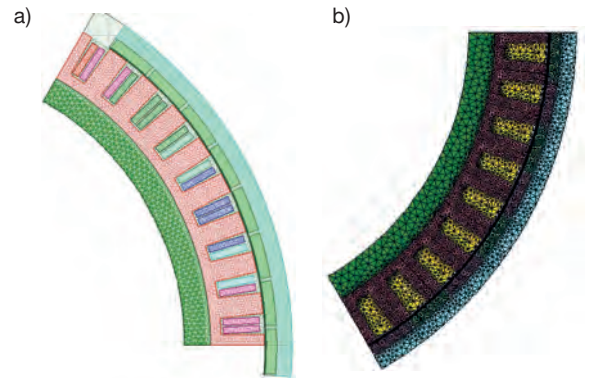
Rys. 9. Charakterystyki strat mocy w magnesach trwałych w funkcji prędkości obrotowej obliczone dla kilku wartości prądu zasilającego

Na rysunku 10 przedstawiono modele 2D silnika w obrębie jednej osi symetrii magnetycznej z wygenerowaną siatką elementów skończonych wykorzystaną do obliczeń.

Obliczenia weryfikujące zostały przeprowadzone dla tych samych prędkości obrotowych, wartości prądu RMS oraz kąta obciążenia gamma. Na rysunku 11 można zauważyć bardzo dobrą zgodność wyników dla trzech różnych metod obliczeniowych. Tak dobra zgodność wyników potwierdza poprawność wyznaczenia zarówno maksymalnego momentu obrotowego wytwarzanego przez silnik, jak i generowanych strat mocy w magnesach trwałych silnika.



Rys. 11. Porównanie obliczonych charakterystyk w programie Ansys Motor-CAD i Ansys Electronics a) momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej, b) strat w magnesach trwałych w funkcji prędkości obrotowej



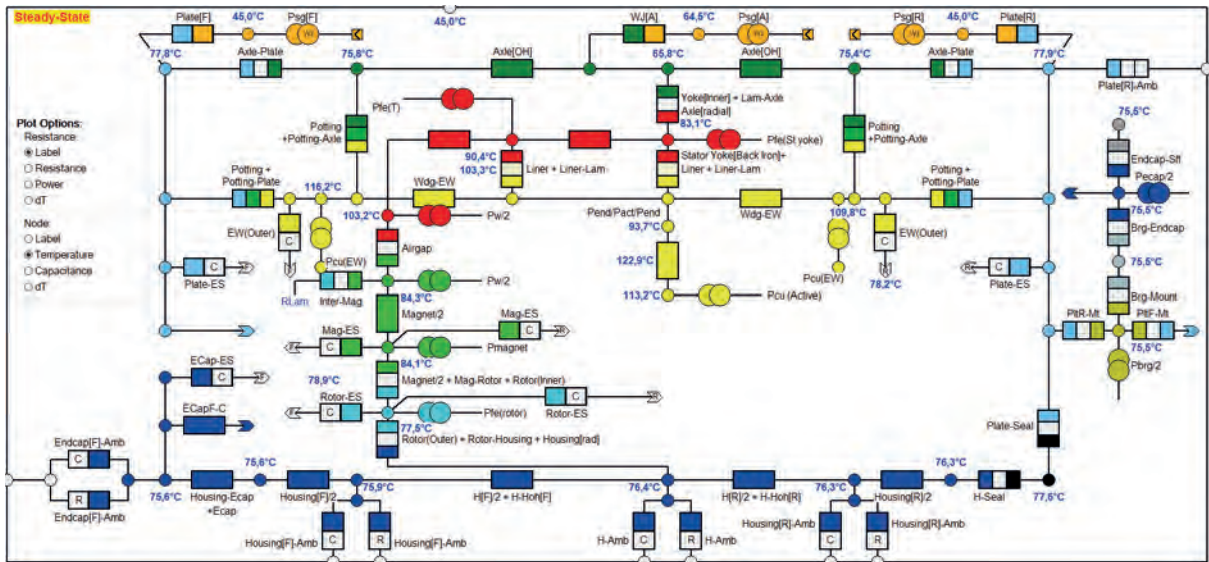
Rys. 10. Model 2D w obrębie jednej osi symetrii magnetycznej z wygenerowaną siatką elementów skończonych a) Ansys Electronics, b) Ansys Motor-CAD

Obliczenia cieplne

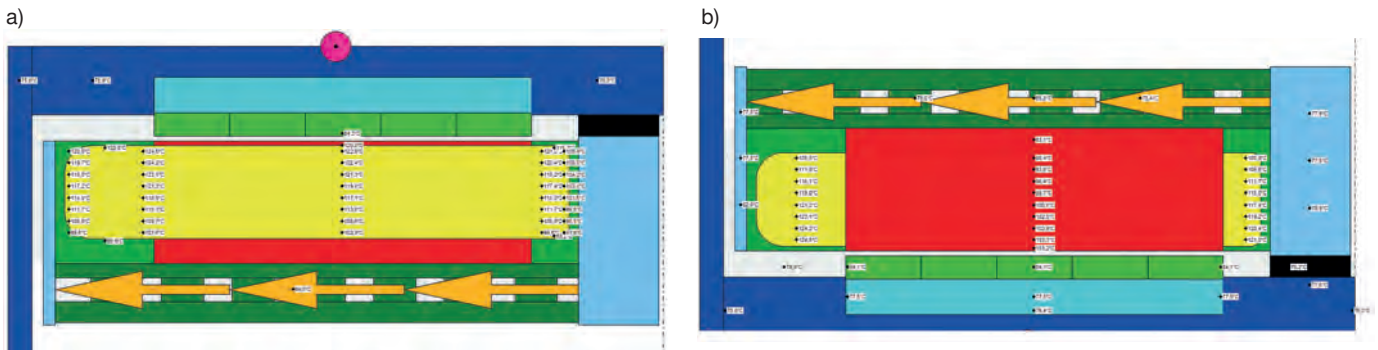
W programie Ansys Motor-CAD, w module thermal został opracowany model termiczny silnika. Na rysunku 12 zamieszczono uproszczony zastępczy schemat cieplny silnika. Na rysunku 13 przedstawiono przekrój modelu wzdłużnego i poprzecznego silnika.

Na modelu (rys. 13) przedstawiono obliczony rozkład temperatury dla znamionowego stanu pracy silnika i temperaturze otoczenia $t_{ot} = 45^{\circ}\text{C}$ oraz chłodzenia mieszkanką EGW 50/50 o temperaturze $t_{cht} = 60^{\circ}\text{C}$. Obliczona średnia temperatura uzwojenia silnika dla tego punktu pracy wynosi $t_{Cu,AV} = 113,2^{\circ}\text{C}$, maksymalna temperatura uzwojenia wynosi $t_{Cu,max} = 124,5^{\circ}\text{C}$, zaś maksymalna temperatura magnesów trwałych wynosi $t_{mag} = 84,3^{\circ}\text{C}$.

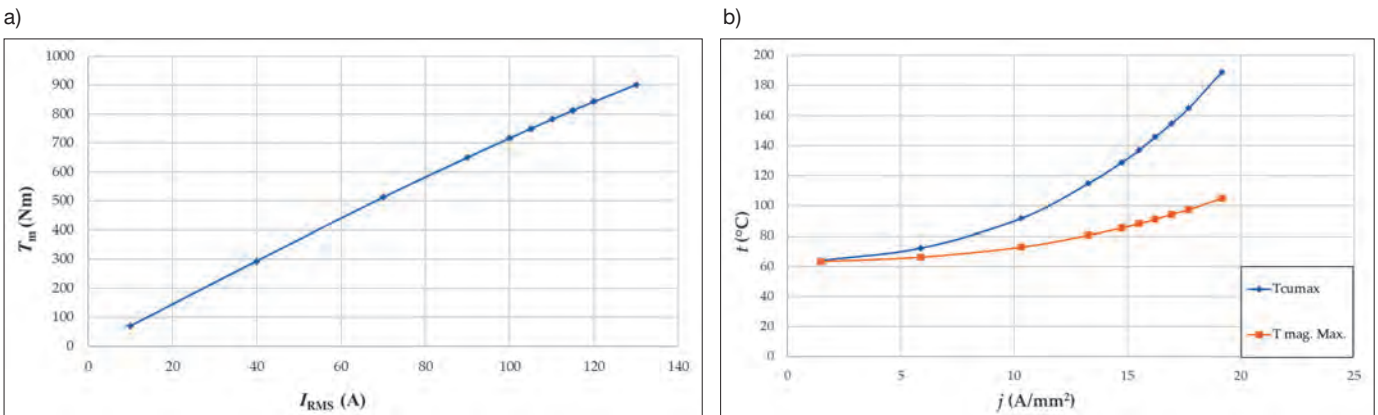
Na rysunku 14 zostały przedstawione obliczone w programie ANSYS Motr-CAD charakterystyki momentu obrotowego w funkcji prądu zasilania oraz charakterystyki temperatury maksymalnej w uzwojeniu oraz w magnesach trwałych silnika w funkcji gęstości prądu zasilania. Obliczone punkty charakterystyki momentu obrotowego odpowiadają punktom na obliczonej charakterystyce temperatur.



Rys. 12. Uproszczony zastępczy schemat cieplny silnika w programie ANSYS Motor-CAD



Rys. 13. Przekrój wzdłużny modelu obwodu elektromagnetycznego silnika z obudową: a) przez żłobek stojana, b) przez ząb stojana



Rys. 14. Obliczone charakterystyki silnika dla prędkości obrotowej $n = 400$ obr./min

- a) momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej,
- b) temperatury maksymalnej w uzwojeniu oraz w magnesach trwałych w funkcji gęstości prądu zasilania

Z obliczonych charakterystyk wynika, że przy zasilaniu prądem $I_{RMS} = 130$ A (gęstość prądu zasilania $j = 19,2$ A/mm²) i założonej pracy S1 silnik wytwarza moment obrotowy $T_m = 902$ N.m. W tym punkcie pracy temperatura maksymalna w uzwojeniu ustala się na poziomie $t_{Cu} = 189$ °C, natomiast temperatura magnesów trwałych ustala się na poziomie $t_{mag.} = 105$ °C.

Wraz ze zmniejszaniem natężenia i gęstości prądu temperatura magnesów oraz uzwojenia zbliża się do zadanej temperatury chłodziwa równej $t_{chl.} = 60$ °C. Stosując klasę izolacji dopuszczającą temperaturę uzwojenia $t_{Cu} = 200$ °C można założyć, że silnik przy tej prędkości obrotowej może pracować stale z gęstością prądu równą $j = 19,2$ A/mm², zachowując przy tym bezpieczeństwo temperaturowe z zapasem około 10°C.

Symulacja cyklu jazdy miejskiej

Cykle jazdy są opisane w postaci zestawu punktów odpowiadających prędkości pojazdu w funkcji czasu. Są one wyznaczone na podstawie przeprowadzonych badań na rzeczywistych pojazdach. Cykle jazdy służą głównie do oceny zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń pojazdu zgodnie z normami dla różnych typów pojazdów, z różnymi napędami. Cykl jazdy jest odwzorowany na hamowni podwozowej, gdzie emisje z rur wydechowych są zbierane i analizowane w celu oceny wskaźników emisji.

Innym testem jest test na hamowni silnikowej, gdzie ocena jest wykonywana na podstawie zestawu punktów momentu obrotowego i prędkości obrotowej silnika. Różnica pomiędzy cyklem modalnym a przejściowym polega na tym, że cykle modalne są kompilacją okresów przyspieszenia i stałej prędkości. Nie mogą one reprezentować rzeczywistego zachowania kierowcy. Cykle przejściowe natomiast obejmują wiele zmian prędkości typowych dla warunków jazdy na drogach z przeciętną dynamiką jazdy. Takie cykle mogą być rozpatrywane w obliczeniach termicznych silnika, ponieważ odwzorowują jazdę przeciętnego kierowcy. Do przeprowadzenia analizy termicznej silnika wykorzystano cykl Artemis Urban [16]. Cykl odzwierciedla jazdę samochodu po mieście z uwzględnieniem dynamiki charakteryzującej przeciętnego kierowcę.

W tabeli 2 przedstawiono parametry cyklu jazdy Artemis Urban, a w tabeli 3 przyjęte do obliczeń parametry pojazdu.

Symulacja cyklu jazdy została przeprowadzona w module Lab programu Motor-CAD.

Tabela 2

Parametry cyklu jazdy Artemis Urban

Parametr	Wartość	jednostka
Czas trwania	993	s
Dystans na drodze	4 874	km
Średnia prędkość pojazdu	17,7	km/h
Maksymalna prędkość pojazdu	57,3	km/h
Procentowy udział zakresu prędkości w cyklu		
Postój ($v = 0$ km/h)	21	%
Prędkość niska ($0 < v \leq 50$ km/h)	77	%
Prędkość średnia ($50 < v \leq 90$ km/h)	2	%
Prędkość wysoka ($v > 90$ km/h)	0	%

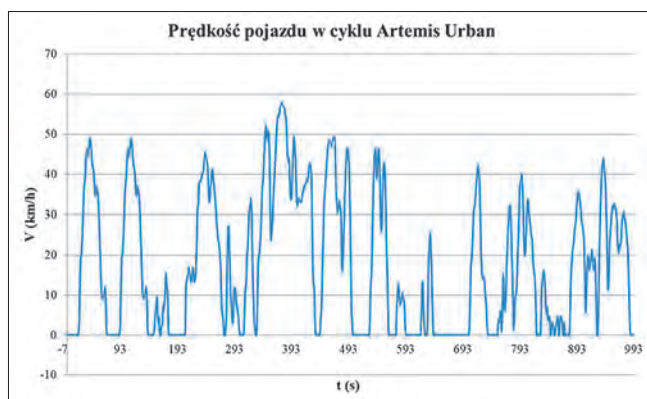
Tabela 3

Parametry pojazdu przyjęte do obliczeń

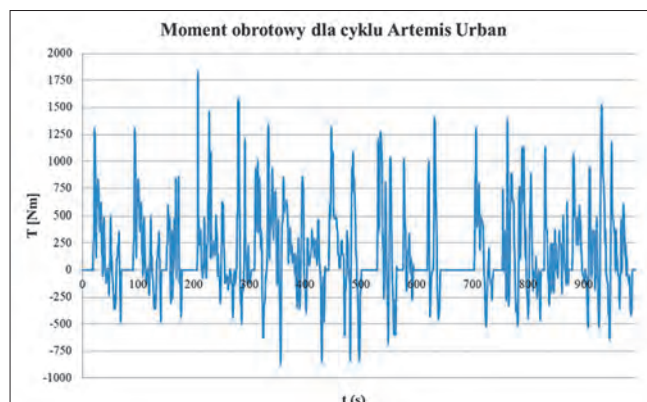
Parametr	Wartość	Jednostka
Masa pojazdu	3,5	t
Powierzchnia czołowa pojazdu	4,4	m ²
Promień koła	0,35	m
Opór toczenia pojazdu	0,02	-
Współczynnik oporu pojazdu	0,31	-
Współczynnik korekcji masy	1,035	-
Gęstość powietrza	1,225	kg/m ³
Przełożenie mechaniczne	1	-
Udział silnika elektrycznego w momencie napędowym	0,5	-
Udział silnika elektrycznego w momencie hamującym	0,25	-

W programie Motor-CAD wykonano obliczenia przy wykorzystaniu opcji „Coupled Transient Solution”, która umożliwia sprzężenie modułów Lab i Thermal w cyklu pracy pojazdu. Pozwala to na zwiększenie dokładności obliczeń, zarówno elektromagnetycznych jak i termicznych, ponieważ model uwzględnia zmiany temperatury uzwojeń i magnesów w trakcie cyklu.

Na rysunku 15 został przedstawiony przebieg prędkości pojazdu w pojedynczym cyklu Artemis Urban. Na rysunku 16 przedstawiono przebieg momentu obrotowego pojedynczego silnika w napędzie, jaki został obliczony na podstawie wymaganego przebiegu prędkości obrotowej, zadanych parametrów samochodu i napędu (dwa silniki w kołach pojazdu).



Rys. 15. Przebieg prędkości pojazdu w czasie dla pojedynczego cyklu Artemis Urban

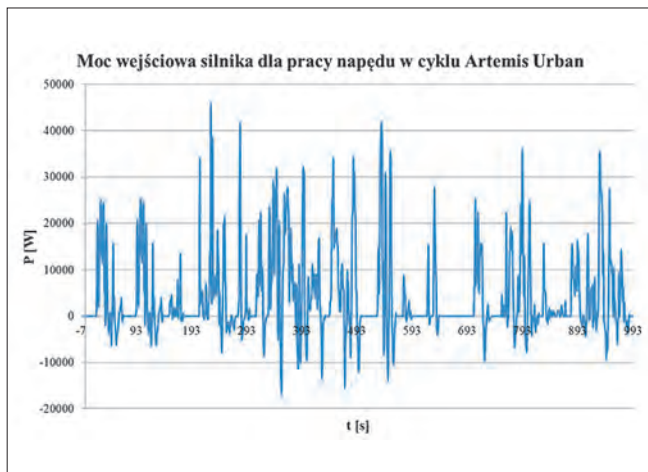


Rys. 16. Obliczony przebieg momentu obrotowego silnika dla cyklu Artemis Urban przy przyjętych założeniach dotyczących samochodu i napędu

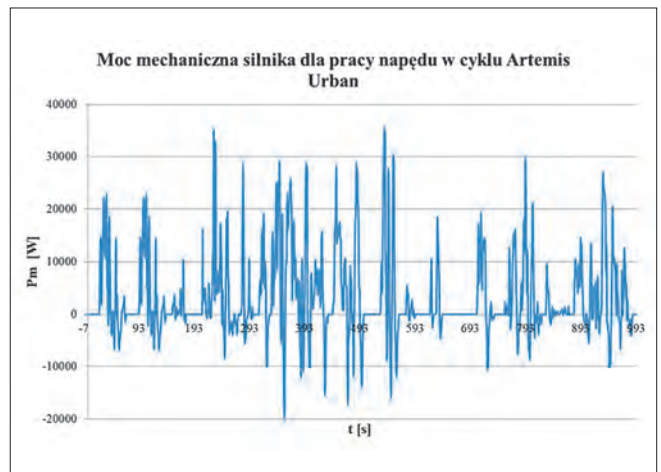
W symulacjach przyjęto, że cykl zostanie powtórzony 5 razy, z uwagi na stosunkowo niedługi dystans pojedynczego cyklu równy ok. 5 km oraz potrzebę odwzorowania maksymalnych temperatur uzwojenia i magnesów trwałych.

Na rysunkach od 15 do 23 zostały przedstawione przebiegi parametrów pracy oraz strat silnika dla jednego cyklu Artemis Urban.

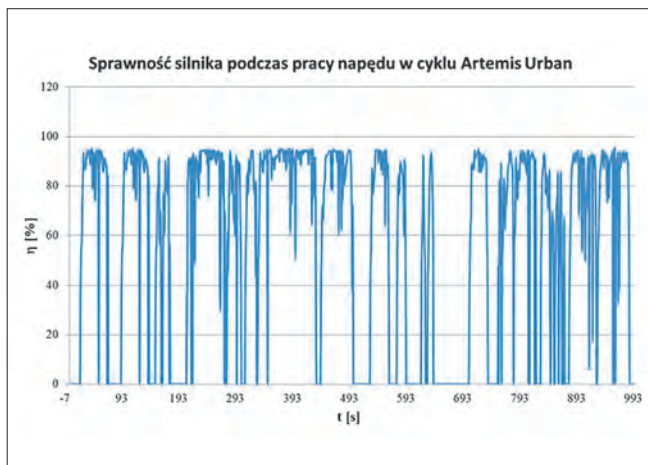
Na rysunku 24 został przedstawiony przebieg temperatur w głównych elementach silnika: maksymalna temperatura uzwojenia, temperatura w zębie stojana (w części przyszczelinowej, gdzie jest ona największa dla tego elementu), w jarmie stojana oraz maksymalna temperatura w magnesach trwałych. Dodatkowo zamieszczony został przebieg temperatury i strat w magnesach trwałych dla wersji silnika bez segmentacji magnesów trwałych.



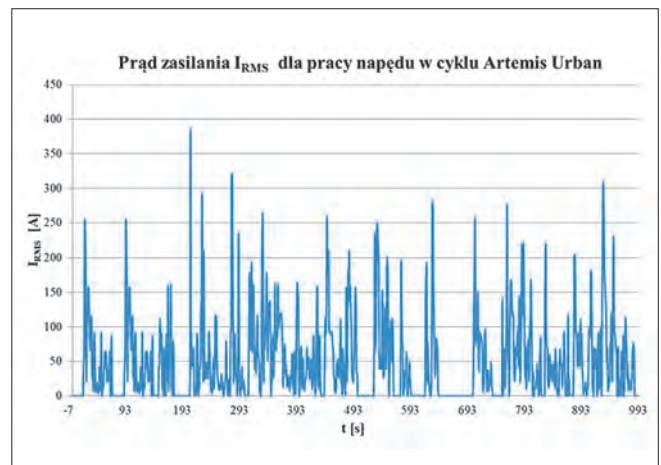
Rys. 17. Obliczony przebieg mocy wejściowej silnika dla cyklu Artemis Urban przy przyjętych założeniach dotyczących samochodu i napędu



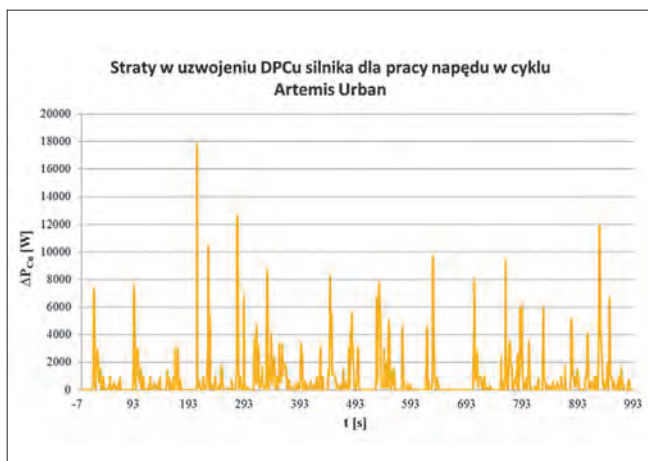
Rys. 18. Obliczony przebieg mocy mechanicznej silnika dla cyklu Artemis Urban przy przyjętych założeniach dotyczących samochodu i napędu



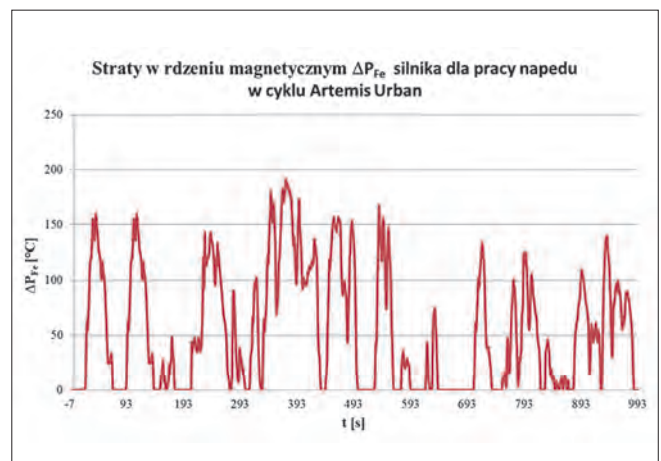
Rys. 19. Obliczony przebieg sprawności silnika dla cyklu Artemis Urban przy przyjętych założeniach dotyczących samochodu i napędu



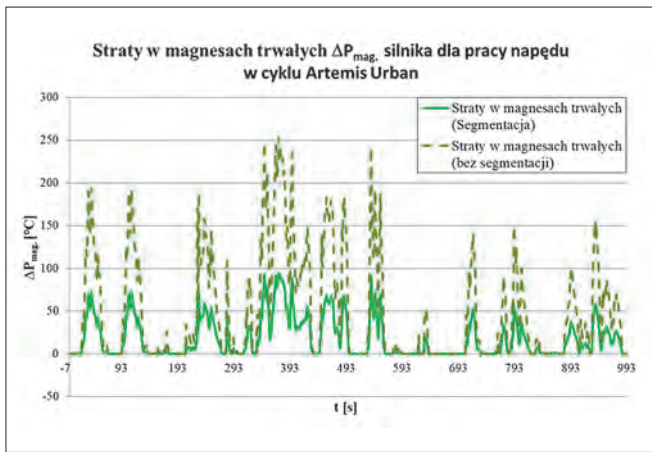
Rys. 20. Obliczony przebieg prądu zasilania I_{RMS} silnika dla cyklu Artemis Urban przy przyjętych założeniach dotyczących samochodu i napędu



Rys. 21. Obliczony przebieg strat mocy w uzwojeniu silnika dla cyklu Artemis Urban przy przyjętych założeniach dotyczących samochodu i napędu



Rys. 22. Obliczony przebieg strat mocy w rdzeniu magnetycznym stojana silnika dla cyklu Artemis Urban przy przyjętych założeniach dotyczących samochodu i napędu



Rys. 23. Obliczony przebieg strat mocy w magnesach trwałych silnika dla cyklu Artemis Urban przy przyjętych założeniach dotyczących samochodu i napędu

Maksymalny moment obrotowy, niezbędny do spełnienia cyklu pracy Artemis Urban dla założonego napędu oraz parametrów samochodu, wynosi $T_{max.} = 1823$ Nm. Maksymalny moment hamujący przy założeniu, że każdy z silników elektrycznych przyjmuje 0,25 wymaganego momentu hamowania wynosi $T_{max. ham.} = 872$ Nm. Maksymalne zapotrzebowanie mocy wynosi ok. $P = 45,5$ kW na silnik i odpowiada punktowi pracy z maksymalnym momentem obrotowym w cyklu.

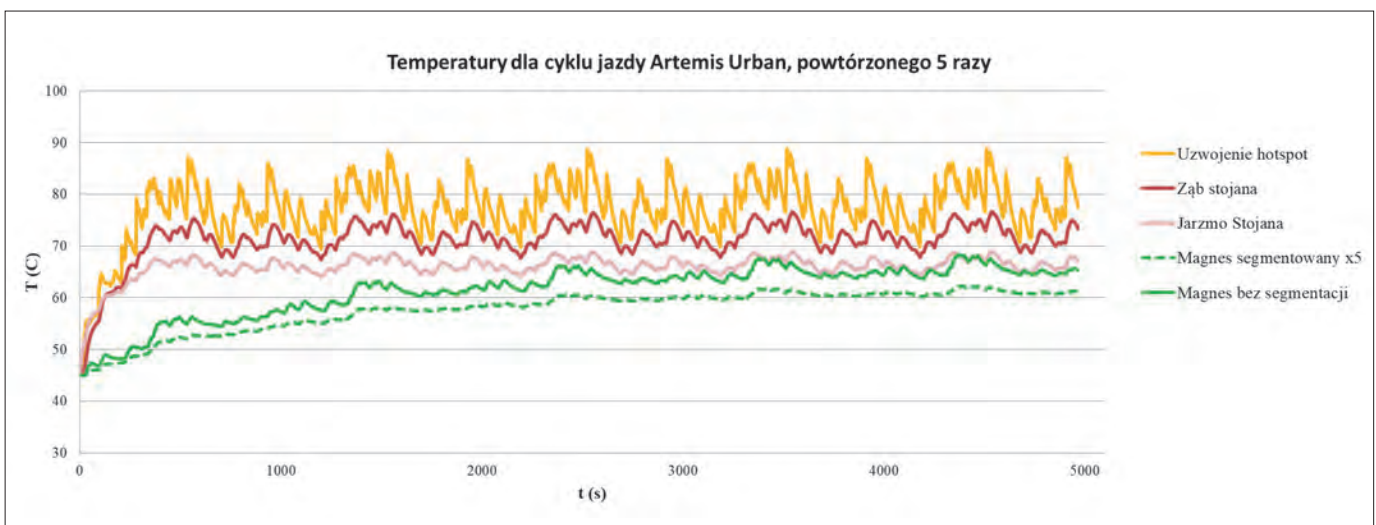
Straty mocy w rdzeniu magnetycznym stojana oraz w magnesach trwałych są znacząco niższe w porównaniu ze stratami w uzwojeniu. Segmentacja magnesów trwałych pozwoliła na znaczące obniżenie strat generowanych w magnesach, nawet o 60%. Z przeprowadzonych symulacji pracy silnika w napędzie pojazdu wynika, że po czwartym powtórzeniu cyklu jazdy Artemis Urban temperatura w najcieplejszym miejscu uzwojenia nie zwiększy się. Temperatura maksymalna uzwojenia nie przekroczyła w trakcie pracy wartości $t_{Cu} = 90^{\circ}\text{C}$. Temperatura jarzma stojana osiągnęła maksymalnie $T_{Fej} = 69^{\circ}\text{C}$. Przyrost temperatury pomiędzy cieczą chłodzącą a temperaturą pakietu jest sto-

sunkowo mały i wynosi $\Delta t = 9^{\circ}\text{C}$. Różnica temperatur jest istotna z uwagi na konstrukcję silnika, w której podgrzewany przez generowane straty mocy w uzwojeniu i rdzeniu magnetycznym pakiet jest osadzony na chłodzonej konstrukcji wsporczej wykonanej ze stopu aluminium. Materiały mają dodatkowo różną rozszerzalność cieplną i znaczący wzrost różnicy temperatur może skutkować zwiększaniem rezystancji cieplnej pomiędzy pakietem a konstrukcją wsporczą. To z kolei może prowadzić do dodatkowego zwiększenia temperatury pracy uzwojenia. Obniżenie generowanych strat w magnesach trwałych przez ich segmentację pozwoliło na zmniejszenie maksymalnej temperatury pracy z $t_{mag.} = 69^{\circ}\text{C}$ do $t_{mag.} = 61^{\circ}\text{C}$. Jest to zmiana stosunkowo duża, natomiast w obu przypadkach temperatura jest bezpieczna dla pracy magnesów.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pracy silnika do zabudowy w kole w napędzie złożonym z dwóch silników pozwoliła na ocenę jego parametrów pracy oraz aspektów termicznych. Analiza została przeprowadzona w programie ANSYS Motor-CAD wykorzystującym model obwodu elektromagnetycznego oraz model termiczny. Model obwodu elektromagnetycznego został zweryfikowany w programie ANSYS Electronics. Osiągnięte temperatury pracy w analizowanym cyklu jezdnym są bezpieczne dla uzwojenia oraz magnesów trwałych. Maksymalna temperatura pracy zastosowanych magnesów trwałych, bez odzwbudzenia $t_{mag.} = 150^{\circ}\text{C}$, natomiast temperatura pracy izolacji uzwojenia oraz żłobka $t_{iz.} = 180^{\circ}\text{C}$. Segmentacja magnesów pozwoliła na znaczące obniżenie generowanych w nich strat mocy, co przełożyło się na obniżenie temperatury pracy magnesów.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że spełnienie cyklu miejskiego standard Artemis jest możliwe przez napęd zarówno ze względu na wymagany moment obrotowy, jak i ograniczenia temperatury elementów silnika, w szczególności jego uzwojenia oraz magnesów trwałych.



Rys. 24. Obliczone temperatury poszczególnych elementów obwodu elektromagnetycznego silnika przy pracy napędu w cyklu jezdnym Artemis Urban

- [1] Wang Zhikun & Ching, Herman & Huang, Shaojia & Wang, Hongtao & Xu, Tao, (2021). *Challenges Faced by Electric Vehicle Motors and Their Solutions*. "IEEE Access." 9. 5228-5249. 10.1109/AC CESS.2020.3045716.
- [2] Cai William & Wu, Xiaogang & Zhou, Minghao & Liang, Yafei & Wang, Yujin, (2021). *Review and Development of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles*. "Automotive Innovation". 4. 10.1007/s42154-021-00139-z.
- [3] Yaohui Gai, Mohammad Kimiabeigi, Yew Chuan Chong, James D. Widmer, Xu Deng, Mircea Popescu, James Goss, Dave Stanton and Andrew Steven Cooling of Automotive Traction Motors: *Schemes, Exam ples and Computation Methods – A Review*, "Transactions on Industrial Electronics" 0278-0046 (c) 2018 IEEE DOI 10.1109/TIE.2018.2835397, IEEE.
- [4] Slaski G., Gudra A., Borowicz A, *Analysis of the influence of additional unsprung mass of in-wheel motors on the comfort and safety of a passenger car*. "Arch. Autom. Eng. Arch. Motoryz." 2014, 65, 51–64.
- [5] Parczewski K., Romaniszyn K., Wnek H., *Influence of electric motors assembly in hubs of vehicle wheels on the dynamics of movement, especially on surfaces with different adhesion coefficient*. "Combust. Eng." 2019.
- [6] Dukalski P., Będkowski B., Parczewski K., Wnęk, H., Urba's A., Augustynek K., *Analysis of the influence of assembly electric motors in wheels on behaviour of vehicle rear suspension system*. "Mater. Sci. Eng." 2018, 421.
- [7] Dukalski P., Będkowski B., Parczewski K., Wnęk H., Urba's A., Augustynek K., *Dynamics of the vehicle rear suspension system with electric motors mounted in wheels*. "Maint. Reliab." 2019, 21, 125–136.
- [8] Frajnkovic M., Omerovic S., Rozic U., Kern J., Connes R., Renner K., Bićek M., *Structural Integrity of In-Wheel Motors*. "SAE Tech." Paper 2018, 1829, 2018.
- [9] Bićek M., Connes R., Omerović S., Gündüz A., Kunc R., Zupan S., *The Bearing Stiffness Effect on In-Wheel Motors*. "Sustainability" 2020, 12, 4070.
- [10] Parczewski K., Wnek H., *Comparison of overcoming inequalities of the road by a vehicle with a conventional drive system and electric motors placed in the wheels*. In Proceedings of the Conference Transport Means 2020, Palanga, Lithuania, 2 October 2020.
- [11] Li G., Wang Y., Zong C., *Driving State Estimation of Electric Vehicle with Four-wheel-hub-motors*. "Qiche Gongcheng Automot. Eng." 2018, 40, 150–155.
- [12] Wanner D., Kreusslein M., Augusto B., Drugge L., *Single wheel hub motor failures and their impact on vehicle and driver behavior*. "Veh. Syst. Dyn." 2016, 54, 1–17 [CrossRef].
- [13] Luo Y., Tan D., *Lightweight design of an in-wheel motor using the hybrid optimization method*. Inst. Mech. Eng., Part D, "J. Automob. Eng." 2013, 227, 1590–1602 [CrossRef].
- [14] Rahim N., Ping H., Tadjuddin M., *Design of an in-wheel axial flux brushless dc motor for electric vehicle*. In Proceedings of the 2006 International Forum on Strategic Technology, Ulsan, Korea, 18-20 October 2006; pp. 16–19.
- [15] Ming-Shyan Wang, Min-Fu Hsieh, Hsin-Yu Lin, *Operational improvement of interior permanent magnet synchronous motor using fuzzy field-weakening control*. "Electronics" 2018,7(12),452;https://doi.org/10.3390/electronics7120452.
- [16] Andre Michel & Infrac, Mario & Bern, Switzerland & Sjödin, Åke & Gadrat, Marie & Nord-Picardie, Cete & Crae, France. (2009). *The ARTEMIS European tools for estimating the Transport pollutant emissions*.

Projekt „Polskie rozwiązania napędu elektrycznego w kołach” („4WHED”) realizowany w Sieci Badawczej Łukasiewicz jest finansowany w ramach dotacji celowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Artykuł stanowi część badań do realizacji pracy doktorskiej w ramach programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Doktorat Wdrożeniowy”, realizowanego przy współpracy z Politechniką Śląską w Gliwicach.

Badania są kontynuacją projektu „Innowacyjne rozwiązania dla bezpośredniego napędu pojazdów elektrycznych”, finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwój w ramach programu LIDER VII, zgodnie z umową: LIDER/24/0082/L-7/15/NCBR/2016 (POLSKA).

Za prace w tematyce silników elektrycznych do zabudowy w piaście koła Zespół Projektowy otrzymał Nagrodę Badawczą Siemens (25. edycja konkursu).

