

Analiza wydajności układu chłodzenia kadłuba w projekcie silnika do napędu pojazdu dostawczego o masie do 3,5 t

Jacek Pytel, Piotr Dukalski

1. Wstęp

Według raportu IEA liczba elektrycznych samochodów osobowych na drodze osiągnęła wartość 3,1 mln w 2017 r., co stanowi wzrost o 57% w porównaniu z rokiem poprzednim, z czego w samych Chinach w tym samym roku liczba samochodów elektrycznych przekroczyła 1 mln.

Obecnie na chińskich drogach porusza się ok. 40% wszystkich samochodów elektrycznych na świecie.

Udział samochodów elektrycznych w 2017 roku w Stanach Zjednoczonych i w Europie osiągnął ok. 25% [1].

W ramach inicjatywy Electric Vehicles Initiative (EVI) uruchomiono program pilotażowy Global EV Pilot City Programme (PCP).

Program ma na celu utworzenie sieci stu miast przyjaznych dla pojazdów o napędzie elektrycznym. Pomysł jest podkorywany faktem, że to właśnie w miastach problem zanieczyszczenia powietrza oraz hałasu jest najbardziej dotkliwy [1].

Te działania mają na celu nawiązanie współpracy i wymianę doświadczeń oraz realizowanie projektów w zakresie np. planowania rozmieszczenia stacji ładowania. Współpracujące miasta będą tworzyły w ten sposób pewnego rodzaju platformy badawcze.

Program zakłada realizację celów strategicznych kampanii EV30@30 EVI, a celem jej jest osiągnięcie 20% udziału rynku pojazdów elektrycznych do 2030 roku, w tym pojazdów osobowych, lekkich samochodów dostawczych, ciężarówek oraz autobusów.

W Polsce również można zauważyć zdecydowany wzrost zainteresowania samochodami elektrycznymi, nie tylko na płaszczyźnie naukowej i technicznej, ale również wdrożeniowej i konsumenckiej [3, 4, 5, 6, 7]. Obecnie największą popularność w kraju zyskują elektryczne autobusy miejskie, co nie tylko jest zgodne z trendami światowymi, ale również wynika z potrzeby odciążenia ruchu w centrach miast oraz redukcji zanieczyszczenia środowiska w największych skupiskach ludzi. Z uwagi na wprowadzanie w miastach Europy ograniczenia poruszania się pojazdami o napędzie spalinowym, naturalne wydaje się być korzystanie z elektrycznych pojazdów dostawczych i komunalnych.

Według raportu IEA publiczne floty autobusowe oraz pojazdy komunalne (np. pojazdy do wywozu śmieci, pojazdy do czyszczenia ulic), które charakteryzują się regularnymi rozkładami jazdy oraz trasami, stanowią atrakcyjne pole do wdrożenia elektromobilności w miastach.

Streszczenie: W artykule autorzy prezentują charakterystyki mocy i momentu obrotowego silnika dedykowanego do elektrycznego pojazdu dostawczego o masie do 3,5 t. Zostały przedstawione modele kadłuba w trzech wariantach, różniących się układem chłodzenia oraz technologią wykonania. Została przeprowadzona analiza wydajności układów chłodzenia.

Słowa kluczowe: silnik z magnesami trwałymi, samochód elektryczny, napęd elektryczny, układ chłodzenia

ANALYSIS OF COOLING SYSTEM EFFICIENCY OF ELECTRIC MOTOR HOUSING FOR COMMERCIAL VEHICLE UP TO 3,5 T

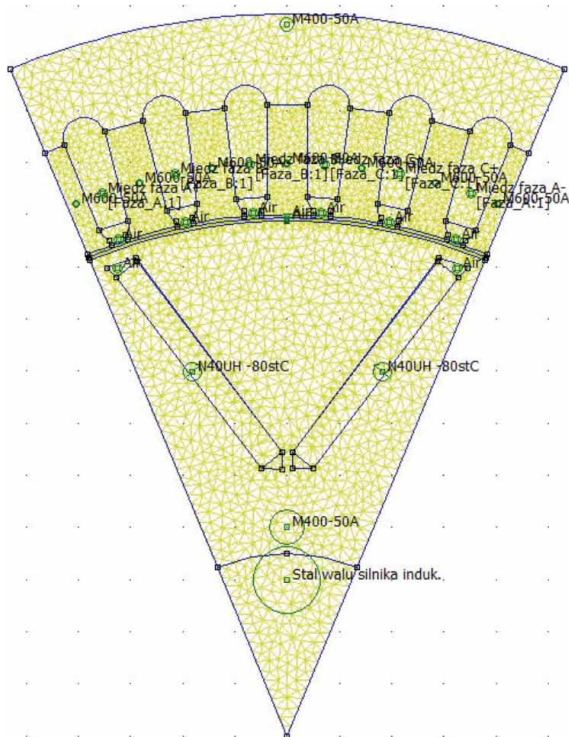
Abstract: In the article, the authors present power and torque characteristics of motor dedicated to an electric delivery vehicle with a weight of up to 3,5 tonnes. Hull models in three variants, differing in the cooling system and manufacturing technology have been presented. The performance analysis of cooling systems was carried out.

Keywords: permanent magnet motor, electric car, electric drive, cooling system

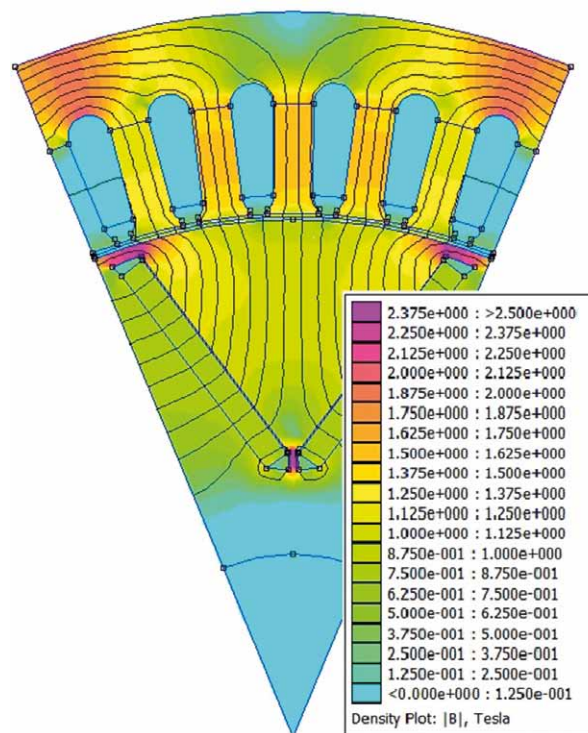
Jest to istotny aspekt ułatwiający wdrożenie autobusów elektrycznych w porównaniu do prywatnych samochodów elektrycznych, ponieważ daje możliwość rozwijania i planowania przez struktury państwowe i regionalne rozmieszczenia stacji ładowania zgodnie z zapotrzebowaniem komunikacji miejskiej. Podobną strategię można przyjąć przy planowaniu dostaw zaopatrzenia oraz tras pojazdów komunalnych.

Liczba pojazdów elektrycznych na polskich drogach rośnie wolniej w stosunku do krajów zachodnich, natomiast coraz więcej pojawia się przedsiębiorców zainteresowanych inwestowaniem w projekty związane z elektromobilnością. Polscy przedsiębiorcy są nastawieni głównie na rynek zachodnioeuropejski, przewidując również dynamiczny rozwój rynku w Polsce w niedalekiej przyszłości.

Institut KOMEL, w ramach odpowiedzi na zapytania sektora prywatnego w zakresie napędów do zastosowania właśnie w pojazdach o masie do 3,5 t, podjął prace projektowe mające na celu opracowanie napędu prototypowego.



Rys. 1. Model obliczeniowy obwodu elektromagnetycznego silnika do zastosowania w samochodzie dostawczym do 3,5 t



Rys. 2. Rozkład indukcji od magnesów w obwodzie elektromagnetycznym silnika do zastosowania w samochodzie dostawczym do 3,5 t

2. Parametry silnika

Projektowany silnik elektryczny jest silnikiem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi, z wirnikiem wewnętrznym IPM typu „V”. Chłodzenie silnika bazuje na zastosowaniu układu przepływu cieczy w kanałach zabudowanych w kadłubie.

Na rys. 1 przedstawiony został model obliczeniowy silnika metodą polowo-obwodową.

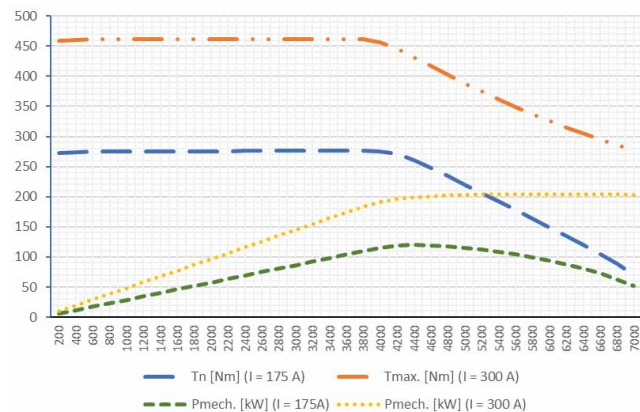
Na rys. 2 przedstawiono rozkład indukcji magnetycznej od magnesów wirnika.

Na rys. 3 przedstawione zostały obliczone charakterystyki momentu obrotowego i mocy dla znamionowego i maksymalnego prądu zasilania.

Obliczone parametry znamionowe silnika zostały przedstawione w tabeli 1.

3. Modele silnika

W celu walidacji technologiczności konstrukcji i kosztów wykonania opracowano cztery modele silnika różniące się kadłubem. Każdy model składa się ze stojana uzwojonego oraz kadłuba silnika z układem chłodzenia. Przyjęto układ, w którym ciecz chłodząca (glikol etylenowy) opływa ścianki kadłuba, zmniejszając temperaturę stojana. Istotnym kryterium przy projektowaniu kadłuba jest taki dobór układu chłodzenia, aby jego wydajność była jak najwyższa, na co ma wpływ między innymi wartość rezystancji cieplnej na styku podzespołów silnika uczestniczących w transferze ciepła, która powinna być jak najniższa. Zaprojektowano następujące modele kadłuba:



Rys. 3. Obliczone charakterystyki mocy mechanicznej oraz momentu obrotowego silnika prototypowego w funkcji prędkości obrotowej, dla prądu znamionowego $I_n = 175$ A oraz prądu maksymalnego $I_{max} = 300$ A

Tabela 1. Parametry znamionowe silnika

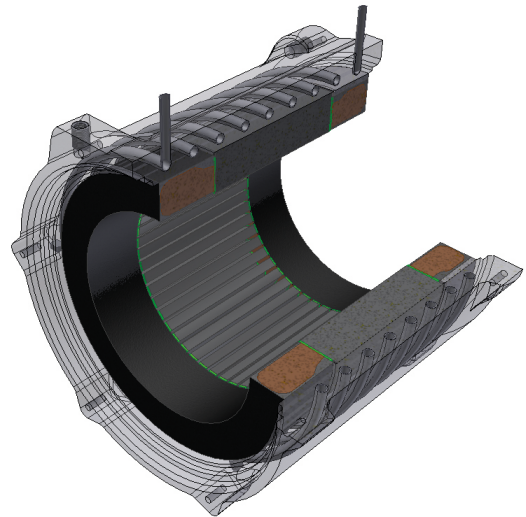
Parametr	Wartość
P_n	120 kW
U_{nDC} (po stronie baterii)	600 V
I_n	175 A
T_n (0–3800 obr./min)	270 Nm
I_{max}	300 A
T_{max}	460 Nm
η_{max}	95%
m	120 kg

- A. odlew aluminiowy z kanałem chłodzącym w postaci zwinętej rurki ze stali nierdzewnej, zatopionej w materiale kadłuba (rys. 4);
- B. kadłub spawany z kanałem toczonym po linii śrubowej (rys. 5);
- C. kadłub spawany z kanałami szeregowymi, występującymi na całej długości kadłuba, równomiernie na obwodzie (rys. 6).

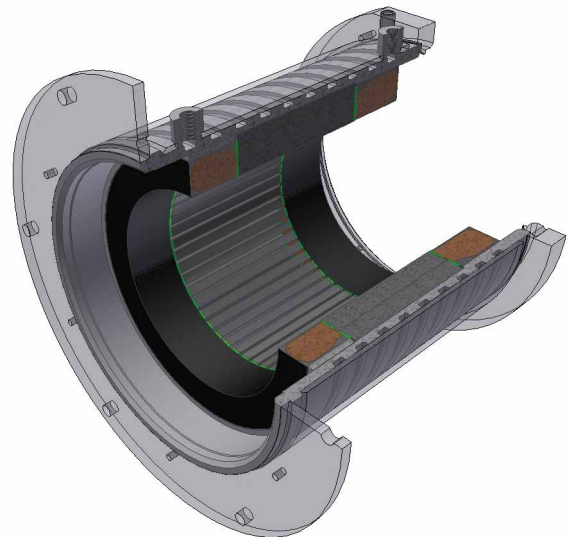
Modele A i B reprezentują ideowo identyczne układy chłodzenia, lecz różnią się technologią wykonania. Model spawany z kanałem toczonym (rys. 5) jest korzystniejszy – wyeliminowano rezystancję cieplną występującą na styku metalowej rurki z materiałem odlewu oraz pocieniono ściankę kadłuba.

Inną koncepcję reprezentuje model C, w którym wykonane są otwory przelotowe okrągłe, połączone szeregowo kanałami w tarczach zamykających. Taka konstrukcja pozwala na wyeliminowanie dodatkowych rezystancji cieplnych, jakie występują w modelu A i B (na styku metalowej rurki z odlewem lub na styku płaszcza zewnętrznego z rurą wewnętrzną kadłuba). Znacząco uproszczono technologię w stosunku do kadłuba odlewanego. Na rynku znane są rozwiązania budowy kadłuba z profili aluminiowych wyciskanych, o kalibrowanym przekroju [8], natomiast na potrzeby prototypu wykonano własny model. Kadłub zoptymalizowano pod kątem ilości otworów w rurze kadłuba oraz wielkości przepływu cieczy chłodzącej. Istnieje taka graniczna ilość otworów oraz graniczny przepływ cieczy chłodzącej, że ich zwiększenie nie wpływa istotnie na wydajność układu chłodzenia, a zatem na sprawność całego silnika. Dodatkowym elementem wpływającym korzystnie na wydajność chłodzenia jest żywica epoksydowa termoprzewodząca, pośrednicząca między czołami uzwojenia a kadłubem. Żywicę uwzględniono w każdym z opisywanych modeli. Współczynnik przewodzenia ciepła dla stosowanej w KOMEL żywicy wynosi $\lambda = 1,3 \text{ W/mK}$ i jest to wartość 50-krotnie większa niż dla nieruchomego powietrza.

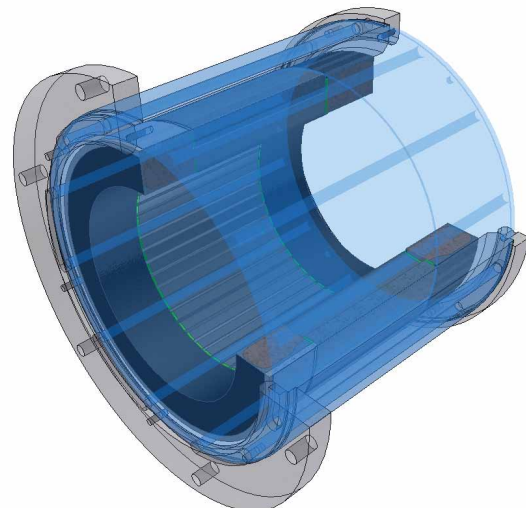
Dla modeli A, B, C wykonano symulacje mające na celu porównanie wydajności układu chłodzenia. Jako odniesienie przyjęto maksymalną temperaturę w stojanie występującą w stanie ustalonym. Najwyższe temperatury wstępują w uzwojeniu. Tworząc model do analizy, przyjęto pakiet blach (rdzeń) i uzwojenie jako objętościowe źródła ciepła. Suma mocy wymienionych źródeł jest wielkością strat w znamionowym punkcie pracy silnika, rozdzielonych stosownie na straty w miedzi i żelazie (z pominięciem wirnika). Uzyskane w symulacjach zakresy temperatur stojana nie opisują modelu rzeczywistego. Modele wykonano w pewnym stopniu uproszczenia tak, by możliwe było wykonanie symulacji bez nadmiernego użycia mocy obliczeniowej. Główne odstępstwo od modelu rzeczywistego polega na uproszczeniu modelu rdzenia stojana. Wskutek uproszczenia powierzchnia oddawania ciepła z uzwojenia do rdzenia, o określonej rezystancji zastępczej, zmniejszyła się 3,3-krotnie. Rzeczywiste temperatury w uzwojeniu będą wyższe. Należy mieć na uwadze, że przyjęte do obliczeń rezystancje, np. między rdzeniem stojana a kadłubem, są silnie zależne od warunków montażu – tolerancji wykonania i uzyskanych jakości powierzchni. W opisywanych modelach na drodze przepływu ciepła od źródła do cieczy chłodzącej wstępują cztery rezystancje [9]:



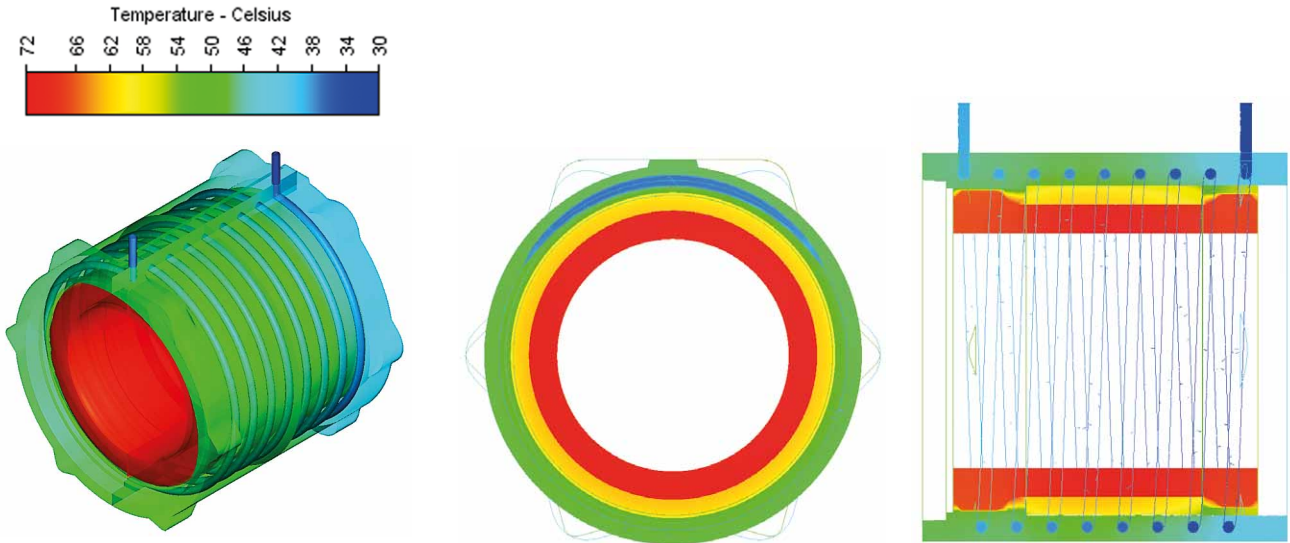
Rys. 4. Kadłub odlewany (A)



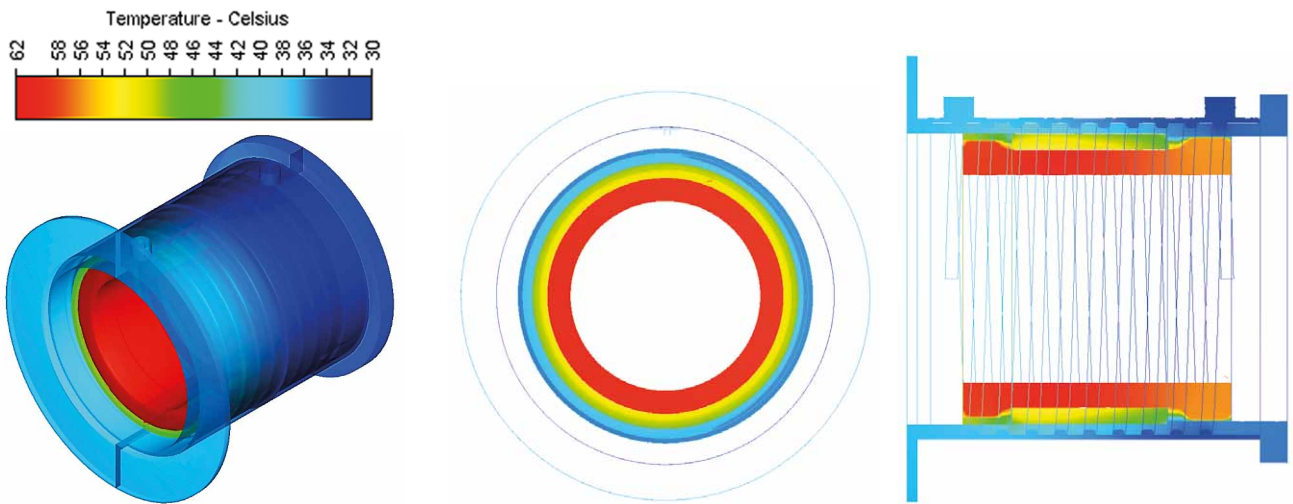
Rys. 5. Kadłub z kanałem toczonym po linii śrubowej (B)



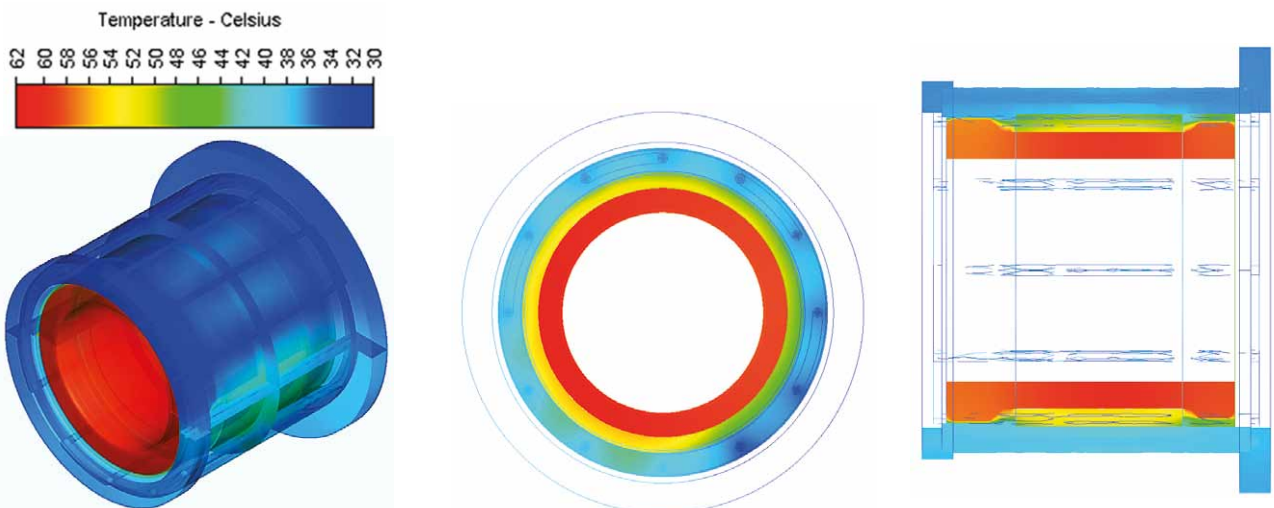
Rys. 6. Kadłub z kanałami szeregowymi (C)



Rys. 7. Rozkład temperatur stojana w kadłubie odlewanym (A)



Rys. 8. Rozkład temperatur stojana w kadłubie z kanałem toczonym po linii śrubowej (B)



Rys. 9. Rozkład temperatur stojana w kadłubie z kanałami szeregowymi (C)

- między zwojem z rurki nierdzewnej a materiałem odlewu $R_1 = 0,00055 \text{ m}^2\text{K/W}$;
- między kadłubem a pakietem blach (rdzeniem) stojana $R_2 = 0,0004 \text{ m}^2\text{K/W}$;
- zastępcza rezystancja cieplna izolacji żłobkowej, tj. między uzwojeniem a rdzeniem stojana $R_3 = 0,009 \text{ m}^2\text{K/W}$;
- na styku elementów aluminiowych kadłuba $R_4 = 0,005 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Uzyskany rozkład temperatur w stanie ustalonym przedstawiono na rys. 7, 8, 9. Wyniki przedstawiono dla tej samej wielkości przepływu cieczy chłodzącej. Różnice między temperaturą cieczy chłodzącej na wlocie i wylocie oraz w rdzeniu stojana przedstawiono w tabeli 2, przy czym dla rdzenia przyjęto punkty o najwyższej i najniższej temperaturze. Najgorszy rezultat uzyskano dla stojana A. Najkorzystniej przedstawia się wariant B, a po nim C.

Tabela 2. Temperatury w stanie ustalonym obliczone dla punktu znamionowego pracy silnika

Punkt pomiaru	Temperatura [°C]		
	Stojan A	Stojan B	Stojan C
Wlot cieczy chłodzącej	30,0		
Wylocie cieczy chłodzącej	38,7	38,2	39,3
Najniższa temperatura w rdzeniu stojana	54,5	41,8	45,1
Najwyższa temperatura w rdzeniu stojana	60,5	51,3	54,1
Najniższa temperatura w uzwojeniu	64,5	56,9	57,8
Najwyższa temperatura w uzwojeniu	71,8	61,6	62,5

4. Podsumowanie

Światowe trendy w zakresie elektromobilności oraz zapytania przedsiębiorców skierowane do Instytutu KOMEL wskazują na wzrost zainteresowania silnikami do napędów pojazdów elektrycznych dedykowanych dla komunikacji miejskiej, sektora komunalnego oraz transportu detalicznego. Po autobusach elektrycznych największy przedmiot zainteresowania stanowią małe pojazdy dostawcze do 3,5 t.

W ramach odpowiedzi na potrzeby potencjalnych klientów Instytut KOMEL rozpoczął prace projektowe, mające na celu opracowanie silnika spełniającego potrzeby określone

w zapytaniach. Przedstawione w artykule charakterystyki momentu obrotowego zostały opracowane na podstawie szeregu zapytań o tę samą aplikację silnika.

Po zaprojektowaniu obwodu elektromagnetycznego opracowano trzy rozwiązania kadłubów o różnej technologii. Kadłub odlewany (A) jest rozwiązaniem najmniej korzystnym z punktu widzenia sprawności układu chłodzenia – na styku materiału kadłuba ze zwojem chłodnicy występuje dodatkowa rezystancja cieplna, niewystępująca w pozostałych modelach.

Na podstawie analizy wydajności układu chłodzenia silnika przyjęto dwa modele (B i C), które zostaną poddane dalszej analizie. Istnieje pole do poprawy wydajności chłodzenia poprzez zastosowanie radiatorów montowanych przy czołach uzwojenia w obszarze stojana o wyższej temperaturze, na co wskazują różnice temperatur pomiędzy czołami strony napędowej i przeciwnej. Zastosowanie dodatkowych radiatorów miałyby na celu zniwelowanie asymetrii cieplnej wskutek ograniczonej pojemności cieplnej chłodziwa.

Autorzy wybiorą jeden model do wykonania prototypu, co zaprezentują w kolejnych publikacjach.

Literatura

- [1] IEE global_ev_outlook_2018.
- [2] <https://www.iea.org/newsroom/news/2018/may/global-ev-pilot-city-programme-launched-at-clean-energy-ministerial.html>.
- [3] KRÓL E., BERNATT J.: *Optimum selection of electrical motor for urban bus drive*. International Conference on Advanced Automotive Technology (ICAT), July 5–7, 2018, Gwangju, Korea.
- [4] <http://e-bus.rafako.com.pl/>.
- [5] ROSSA R., BĘDKOWSKI B., BERNATT J., MEINICKE T.: *Badania eksploatacyjne miejskiego samochodu dostawczego z napędem elektrycznym e-Kit*. „Logistyka” 6/2014.
- [6] DUKALSKI P., BĘDKOWSKI B., WOLNIK T., JAREK T.: *Założenia projektu silnika do zabudowy w piaście koła samochodu elektrycznego*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe” 6/2018.
- [7] DUKALSKI P., BĘDKOWSKI B., PARCZEWSKI K., WNĘK H., URBAŚ A., AUGUSTYNEK K.: *Dynamics of the vehicle rear suspension system with electric motors mounted in wheels*. „Eksploatacja i Niezawodność” Vol. 21, No. 1, 2019.
- [8] BAUSER M., SAUER G., SIEGER K.: *Extrusion: Second Edition*. ASM International Material Park, Ohio, 2006.
- [9] BĘDKOWSKI B.: *Praca doktorska: System doboru i oceny parametrów układów chłodzenia wybranych maszyn elektrycznych*. Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała 2015.

 Jacek Pytel

Piotr Dukalski

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

artykuł recenzowany