

Piotr SZYMCZAK¹
Victor GREBENIKOV², Maksim PRYJMAK²

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny (1)
Instytut Elektrodynamiki Narodowej Akademii Nauk Ukrainy (2)

Badania symulacyjne silników elektrycznych z magnesami trwałymi do trolejbusów

Streszczenie: Referat omawia rezultaty modelowania silników elektrycznych synchronicznych z magnesami trwałymi do napędu trolejbusów o średniej pojemności, które mogą być zastosowane w miejsce dotychczasowych silników spalinowych. Przeprowadzono badania trzech wariantów silników elektrycznych z różnorodną konfiguracją magnesów trwałych na wirniku. Z pomocą programu Infolytica MotorSolve przeanalizowano charakterystyki robocze, a wykorzystując program Comsol dokonano obliczeń cieplnych silnika przy zastosowaniu w nich chłodziwa cieczowego. W zakończeniu pracy sformułowano wnioski

Keywords: magnesy trwałe, moment elektromagnetyczny, silnik synchroniczny, trolejbus.

Wstęp

Przegląd i charakterystyki elektrycznych silników samochodowych omówiono w pracach [1-3]. W 2001 r. na całym świecie nastąpił spadek produkcji silników z magnesami trwałymi, obecnie jednak należy odnotować wzrost popytu na zastosowanie ich do środków transportu w mieście. Należy przewidywać, że trend ten utrzyma się i będzie nadal rósł [2]. Do autobusów o średniej pojemności do 50 osób stosuje się zwykle silniki spalinowe o danych: $P_{\max} = 100$ kW ($n = 3200$ obr/min) i $M_{\max} = 265$ Nm ($n = 1600$ obr/min). Napęd elektryczny zapewnia istotnie zmniejszenie zapotrzebowania na energię nawet o ok. 45% [4]. Ponadto zastosowanie silnika elektrycznego w miejskim trolejbusie pozwala zmniejszyć poziom szkodliwych zanieczyszczeń oraz zwiększyć komfort jazdy pasażerów dzięki ograniczeniu poziomu szumu w pojeździe. Celem referatu jest przedstawienie wybranych wyników badań symulacyjnych i obliczeń charakterystyk roboczych silnika synchronicznego do miejskiego trolejbusu z różnymi wariantami konfiguracji magnesów trwałych na wirniku.

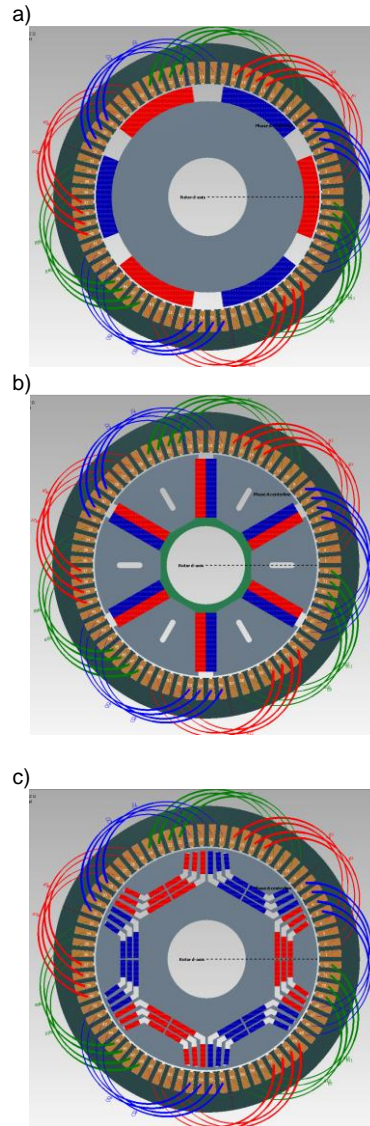
Rezultaty badań symulacyjnych

Na rys 1. pokazano trzy propozycje układów magnetycznych z 6 biegunami wirnika silnika. W wariacie M1 wirnik posiada magnesy trwałe (MT) o promieniowym namagnesowaniu, w drugim wariacie M2 – o tangencjalnym namagnesowaniu, natomiast w wariacie M3 – każdy biegun składa się z 12 elementarnych MT, rozmieszczonych wg tzw. konstrukcji specjalnej zagłębionej na wirniku [3]. Osiowa długość magnetowodu stojana wynosi $L_z = 145$ mm, liczba żłobków stojana $Z = 72$, całkowity ciężar MT dla każdego wariantu silnika jest jednakowy $m_{MT} = 13,21$ kg.

We wszystkich obliczeniach przyjęto, iż indukcja remanencji magnesów trwałych wynosi $B_r = 1,24$ T. Magnetowód stojana wykonany jest ze stali elektrotechnicznej CT22111, magnetowód wirnika – skonstruowany ze stali CT20; wał wirnika wypełniony jest z niemagnetycznego materiału o przenikalności magnetycznej – $\mu_w = 1$.

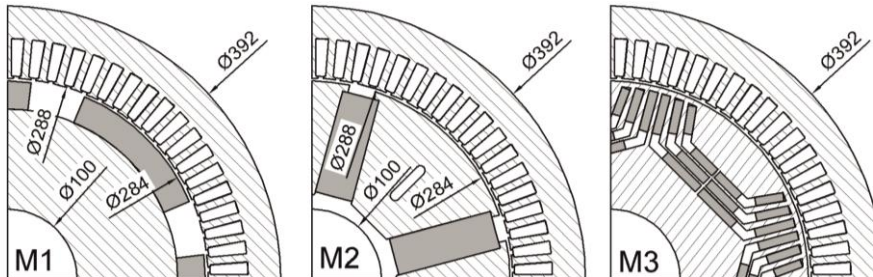
Model obliczeniowy wraz z rozmiarami geometrycznymi dla trzech wariantów pokazany jest na rys. 2. Na rys. 3. pokazano dla trzech badanych modeli silnika elektrycznego rozkłady pola magnetycznego, z uwzględnieniem nieliniowości stali stojana i wirnika, w przekroju na długości $\frac{1}{2} \cdot L_z$ od przedniej krawędzi aktywnej części maszyny przy orientacji wirnika wg osi d. W tym położeniu wirnika względem stojana pole generowane przez magnesy trwałe skierowane jest zgodnie z polem wytworzonym przez trzy fazy stojana, które włączone są w następujący sposób: A(+), B(-), C(0). Przy badaniach symulacyjnych założono znamionową gęstość prądu w uzwojeniach $J_1 = 5 \text{ A/mm}^2$, współczynnik zapelnienia żłobka miedzią $k_Q = 0,4$. Analizując rezultaty symulacji pola magnetycznego dla trzech wariantów można odnotować następujące wnioski: jarmko stojana dla ww. trzech wariantów nie nasycy się i strumienie rozproszenia przy szczelinie powietrznej $\delta_0 = 2 \text{ mm}$ są tak małe, że można je pominąć.

W celu określenia wpływu analizowanych konfiguracji magnetycznej systemu wirnika na wartość momentu elektromagnetycznego M_{elm} były przeprowadzane badania studialne, które pozwoliły wyznaczyć zależności M_{elm} od kąta geometrycznego obrotu wirnika, co przedstawiono na rys. 4. Aby zmniejszyć pulsacje M_{elm} wykonano skos biegunów na jedną podziałkę żłobkową [5]. Żeby ten fakt uwzględnić przeprowadzono obliczenia w trzech wariantach wykorzystując analizę dwuwymiarową. Dla każdej z badanych maszyn elektrycznych były zatem obliczane trzy dwuwymiarowe modele w przekroju na długościach $\frac{1}{6} L_z$, $\frac{1}{2} L_z$ i $\frac{5}{6} L_z$ od przednich krawędzi aktywnej części systemu magnetycznego. Natomiast osiowa długość każdego z modeli była równa $\frac{1}{3}$ osiowej długości modelu obliczeniowego. Wypadkowy moment elektromagnetyczny określany był jako suma momentów trzech ww. dwuwymiarowych modeli.



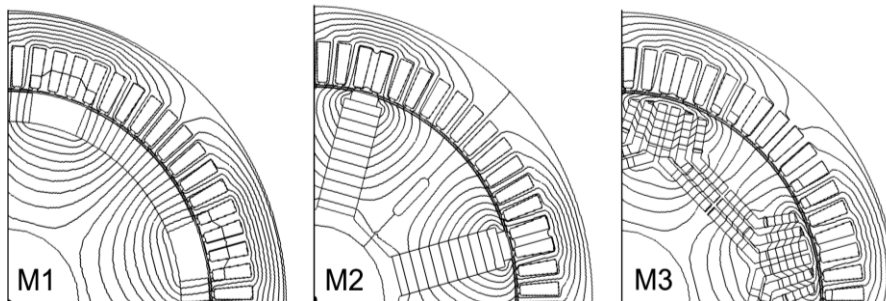
Rys. 1. Trzy konfiguracje magnetowodu silnika synchronicznego z uzwojeniami
a) powierzchniowe usytuowanie MT – M1,
b) radialne usytuowanie MT – M2,
c) zagłębione usytuowanie MT – M3.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016



Rys. 2. Modele obliczeniowe dla trzech wariantów silników synchronicznych.

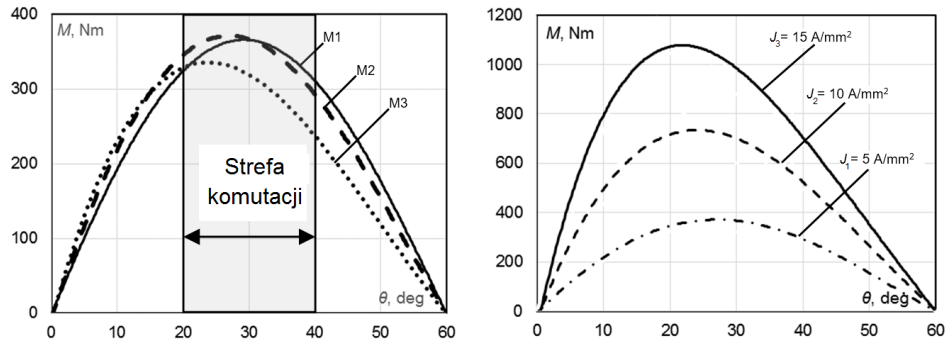
Na rys. 4a. przytoczono, obliczone w programie Infolytica Magnet, zależności $M_{elm}=f(\theta)$ dla trzech konfiguracji ($p=3$) w zakresie $\theta=0^\circ\pm 60^\circ$ od osi d. W celu zapewnienia odpowiedniej komutacji faz silnik wyposaża się w czujnik położenia wirnika. W ciągu każdych 20° następuje cykliczna zmiana stanu czujnika i wydaje on komendę do włączenia odpowiednich faz. Algorytm przełączania faz jest następujący: A(0) – B(-) – C(+); A(-) – B(0) – C(+); A(-) – B(+) – C(0) itd. W ten sposób w granicach obszaru komutacji równej 20° włącza się tylko dwie fazy zgodnie z zadanym algorytmem.



Rys. 3. Rozkłady pola magnetycznego dla trzech wariantów silnika.

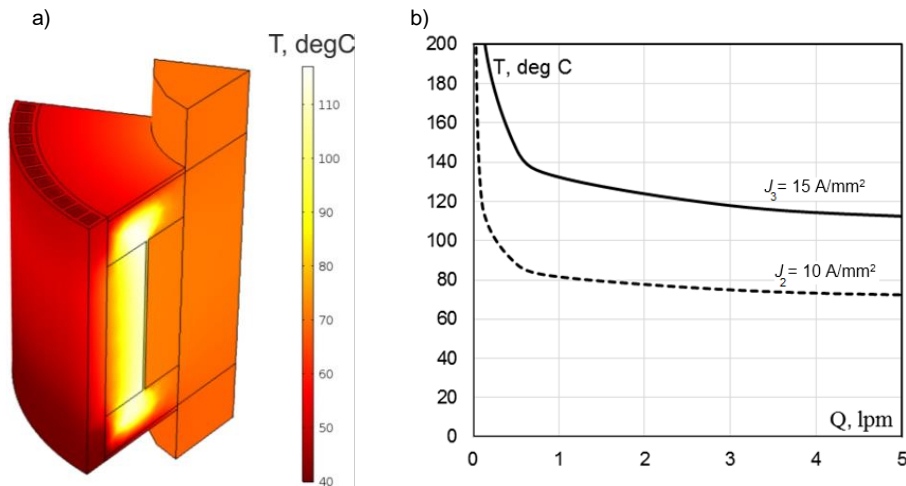
Analiza porównawcza charakterystyk badanych wariantów silników pokazała, że największy moment M_{elmmax} uzyskujemy w wariantcie M2 z radialnym rozmieszczeniem MT i tangencjalnym ich namagnesowaniem. Z tych względów ta konfiguracja systemu magnetycznego była wybrana do dalszych obliczeń. W silniku synchronicznym z MT wartość momentu elektromagnetycznego zwiększa się praktycznie proporcjonalnie do wartości prądu w fazach stojana. Dlatego wyznaczono m.in. zależności M_{elm} dla różnych gęstości prądu w fazach stojana: $J_1 = 5 \text{ A/mm}^2$, $J_2 = 10 \text{ A/mm}^2$, $J_3 = 15 \text{ A/mm}^2$ co przedstawiono na rys. 4b. Zwiększenie gęstości prądu jest ograniczone nagrzewaniem się uzwojeń silnika, aby nie przekroczyć temperatury dopuszczalnej.

W celu zwiększenia tzw. współczynnika efektywności konstrukcji $C_{p/m}=P/m$ [kW/kg], należy zastosować wyższą klasę izolacji lub chłodziwo cieczowe z wymuszoną cyrkulacją. Przyjęto rozwiązania drugie i umieszczono na powierzchni stojana zbiornik z chłodziwem oraz pompę cyrkulacyjną. Zbiornik ma grubość 20 mm i rozdzielony jest na sekcje w celu zwiększenia powierzchni wymiany ciepła. Połączenia czołowe uzwojeń nasyca się specjalną masą izolacyjną z dobrym współczynnikiem wymiany ciepła.



Rys. 4. Zależności M_{elm} od kąta geometrycznego wirnika dla a) trzech badanych wariantów silnika M1, M2, M3 b) wariantu M2 przy różnych gęstościach prądu.

Aby określić dopuszczalną gęstość prądu w uzwojeniach stojana zostały przeprowadzone badania cieplne w programie COMSOL, które wykazały, że w układach z chłodziwem cieczowym oraz pompą o wydajności 5 l/min, uzwojenia silnika przy gęstości prądu $J_2 = 10 \text{ A/mm}^2$ nie nagrzewają się powyżej $75 \text{ }^\circ\text{C}$, a dla $J_3 = 15 \text{ A/mm}^2$ nie przekraczają temperatury 115°C , co jest akceptowalne zarówno dla uzwojeń silnika, jak i dla współczesnych magnesów trwałych NdFeB. Na rys. 5a. przytoczono rozkład pola temperatury przy gęstości prądu $J_3 = 15 \text{ A/mm}^2$, a także zależność temperatury uzwojeń silnika od wydajności pompy cyrkulacyjnej dla dwóch gęstości prądu w stojanie $J_2 = 10 \text{ A/mm}^2$ i $J_3 = 15 \text{ A/mm}^2$.



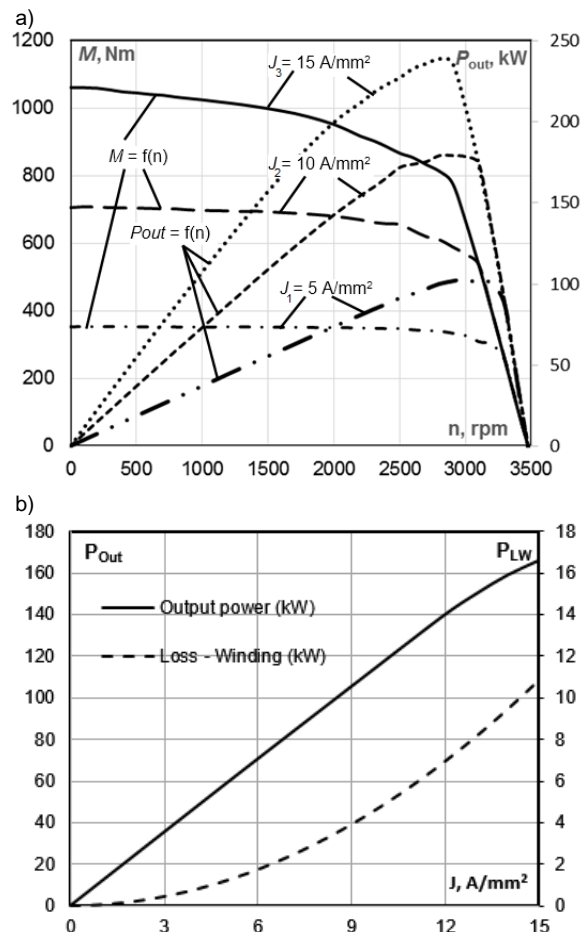
Rys. 5. Wyniki obliczeń cieplnych dla silnika M2
a) pole temperatury przy gęstości prądu $J_3 = 15 \text{ A/mm}^2$,
b) zależności temperatury uzwojeń stojana od wydajności pompy dla dwóch gęstości prądu.

Obliczone w programie Infolytica MotorSolve robocze charakterystyki silnika dla wariantu M2 zostały przedstawione na rys. 6a. Ponieważ zakres prędkości obrotowej spalinowego silnika, stosowanego dla miejskich autobusów średniej pojemności, mieści się w granicach 500-3500 obr/min, to robocze charakterystyki silnika elektrycznego typu

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

M2 obliczono również dla ww. zakresu przy trzech gęstościach prądu w uzwojeniach. Na rys. 6a. przedstawiono rezultaty dla znamionowej gęstości prądu $J_1 = 5 \text{ A/mm}^2$: $M_{\max}=350 \text{ Nm}$ przy $n=1600 \text{ obr/min}$ oraz $P_{\text{wyj}}=100\text{kW}$ przy $n=3200\text{obr/min}$. Po zastosowaniu chłodzenia cieczą zwiększono gęstość prądu do wartości $J_3 = 15 \text{ A/mm}^2$ i osiągnięto wyniki: $M_{\max}=990 \text{ Nm}$ przy $n=1600 \text{ obr/min}$ oraz $P_{\text{wyj}}=135 \text{ kW}$ przy $n=3200 \text{ obr/min}$. Jak widać na podstawie przytoczonych wyżej rezultatów, dzięki zwiększonej gęstości prądu uzyskujemy znacznie zwiększone wartości momentu, co zapewnia lepsze charakterystyki napędowe trolejbusu.

Na rys. 6b zestawiono charakterystyki mocy wyjściowej na wale i strat mocy w uzwojeniach stojana w zależności od gęstości prądu przy uwzględnieniu nagrzewania się uzwojeń.



Rys. 6. Charakterystyki robocze silnika M2 dla trzech wartości gęstości prądu w uzwojeniach
a) zależności mocy wyjściowej i momentu elektromagnetycznego w funkcji prędkości obrotowej,
b) zależności mocy wyjściowej i strat w uzwojeniach w funkcji gęstości prądu.

Z analizy charakterystyk silnika M2 wynika z jednej strony, że wzrost prądów fazowych powoduje zwiększone straty mocy, a z drugiej – zwiększenie mocy wyjściowej, co skutkuje polepszeniem wskaźnika konstrukcyjnego silnika elektrycznego. Na przykład dla gęstości prądów $J_3 = 15 \text{ A/mm}^2$, wskaźnik ten zwiększa się blisko 3 razy w porównaniu do warunków znamionowych pracy silnika bez chłodzenia.

Całkowity ciężar silnika wg wariantu M2 wyniósł 115,99 kg, z czego części składowe stanowią: rdzeń stojana 42,13 kg, rdzeń wirnika (bez MT) 39,66 kg, uzwojenia stojana 20,99 kg oraz MT 13,21 kg. Wskaźnika konstrukcyjnego silnika synchronicznego dla mocy $P_{wyj}=100\text{kW}$ (przy $n=3200\text{obr/min}$ i $J_1 = 5 \text{ A/mm}^2$) wynosi $C_{p/m}=0,86$, a dla mocy $P_{wyj}=135\text{kW}$ (przy $n=3200\text{obr/min}$ i $J_3 = 15 \text{ A/mm}^2$) – $C_{p/m}=1,16$. Otrzymane rezultaty zostały porównane z wynikami zawartymi w tab. 4. [2], dla których dla mocy 85 kW $C_{p/m}=0,71$, a dla mocy 120 kW i 200 kW $C_{p/m}=1$. Wskaźnik konstrukcyjny silnika M2 mieści się w standardach firmy Siemens.

Wnioski

1. W rezultacie badań stwierdzono, że największy moment elektromagnetyczny posiada konfiguracja wirnika silnika synchronicznego w wariantcie M2 z radialnym rozmieszczeniem magnesów trwałych i tangencjalnym ich namagnesowaniem.
2. Przy zastosowaniu chłodziwa cieczowego można istotnie zwiększyć gęstość prądu od warunków znamionowych $J_1 = 5 \text{ A/mm}^2$ do $J_3 = 15 \text{ A/mm}^2$, zapewniając tym samym blisko trzykrotne zwiększenie maksymalnego momentu elektromagnetycznego.
3. Badania studialne potwierdziły, że silnik elektryczny synchroniczny wykonany wg wariantu M2 może być z powodzeniem zamieniony z silnikiem spalinowym w napędzie trolejbusów średniej pojemności.

P.S.

Praca została wykonana w ramach współpracy Instytutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy z Wydziałem Elektrycznym ZUT w Szczecinie.

Literatura

1. Szymczak P., Grebenikov V., Pryjmak M. Przegląd elektrycznych silników samochodowych., „Wiadomości elektrotechniczne”, 2013, Nr 8, s. 28-33.
2. Gieras J. F., Bianchi N., Electric Motors for Light Traction, EPE Journal Vol. 14 no 1 February 2004, s.12-23.
3. Miller J. M., Propulsion Systems for Hybrid Vehicles, The IEE, 2004
4. Milewski A. Przyszłość pojazdów elektrycznych w transporcie publicznym, prezentacja, <http://www.zdiz.gdynia.pl/images/stories/segment/prezentacja%20-%20Solaris.pdf>
5. Grebenikov V., Pryjmak M. Methods for reducing of electromagnetic torque ripple in electric machines with radial magnetization permanent magnets (in Russia). Hydropower of Ukraine Hidroenergetika UkraYini. 2014, № 2-3, s. 62-67.

Autorzy: dr inż. Piotr Szymczak; e-mail: piotr.szymczak@zut.edu.pl Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych ZUT w Szczecinie
dr hab. inż. Victor Grebenikov, email: elm1153@gmail.com, inż. Maksim Pryjmak, email: maksim.prv@gmail.com, Instytut Elektrodynamiki NAN Ukrainy