

Sposób projektowania barier magnetycznych w strukturze wirnika z magnesami trwałymi silnika do napędu samochodów

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki badań symulacyjnych maszyny synchronicznej wzbudzonej magnesami trwałymi do napędu pojazdów elektrycznych. Pokazano etapy tworzenia nietypowej konstrukcji wirnika z magnesami zagnieżdżanymi, bazującej na strukturze wirnika dla maszyn reluktancyjnych. Na podstawie analizy polowej w przestrzeni 2D, pokazano rezultaty symulacji rozkładu pola magnetycznego, wyniki obliczeń indukcyjności oraz momentu elektromagnetycznego otrzymanych dla trzech struktur wirnika. Dodatkowo wyznaczono charakterystykę mechaniczną modelu silnika o mocy do 50 kW.

Słowa kluczowe: maszyna elektryczna, magnesy trwałe, moment reluktancyjny, moment elektromagnetyczny, regulacja prędkości

Wstęp

W obecnych czasach nastąpił gwałtowny rozwój pojazdów samochodowych z napędem elektrycznym. Dotyczy to jednostek o napędzie zarówno hybrydowym jak i elektrycznym. Niezależnie jednak od rodzaju napędu główną uwagę skupia się na maszynie elektrycznej. Od niej wymaga się wysokich osiągnięć w małej objętości, co spełnić można jedynie budując silniki wysokoobrotowe o prędkościach sięgających kilkanaście (nawet 13) tys. obr./min. To przynosi szereg problemów konstrukcyjnych, związanych z efektywnością sterowania, regulacją prędkości obrotowej w szerokim zakresie (często w stosunku 3:1 nawet 4:1 do prędkości bazowej) oraz chłodzeniem takich maszyn [1,2].

Istnieje wiele typów maszyn, które stosuje się w napędach samochodowych. Należą do nich maszyny indukcyjne (klatkowe), reluktancyjne także wspomagane magnesami trwałymi oraz synchroniczne, tu w przeważającej większości przypadków wzbudzone magnesami. Ponadto, poszukuje się innych nietypowych maszyn o wzbudzeniu hybrydowym, w wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych [3-7], które mają spełnić wysokie wymagania w zakresie szerokiej regulacji prędkości obrotowej przy wysokiej sprawności.

W pracy przedstawiono strukturę maszyny z magnesami trwałymi, do zastosowania w napędzie samochodów elektrycznych, dla której omówiono sposób tworzenia barier dla strumienia magnetycznego do zróżnicowania reluktancji wirnika.

Budowa struktury wirnika

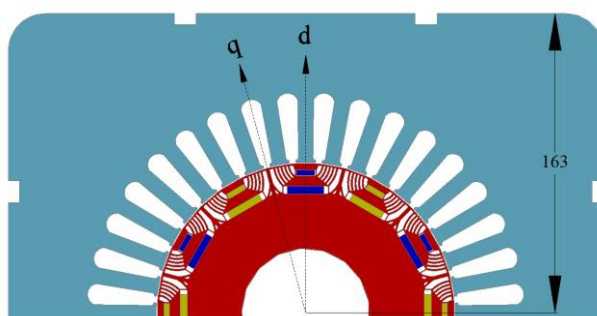
Projektując maszynę synchroniczną o wirniku z magnesami zagnieżdżanymi należy analizować jej indukcyjność, zwłaszcza w dwóch głównych osiach związanych z wirnikiem: osi podłużnej d oraz poprzecznej q . Od różnicy między indukcyjnościami uzwojeń stojana w osi podłużnej L_d i poprzecznej L_q zależy bowiem wartość momentu reluktancyjnego. Maszyna wytwarzać będzie moment elektromagnetyczny M_e w wyniku oddziaływania strumienia sprzężonego Ψ_{MT} wzbudzanego magnesami i prądu stojana

w osi poprzecznej i_q , który może być podwyższony lub zmniejszony właśnie o moment reluktancyjny zgodnie z równaniem 1.

$$(1) \quad M_e = \frac{3}{2} p \psi_s \times i_s = \frac{3}{2} p (\psi_{MT} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

Im większa różnica w indukcyjnościach $L_d - L_q$ tym skuteczniej można osłabiać strumień skojarzony z uzwojeniami stojana Ψ_s prądem w osi podłużnej i_d , podczas pracy silnika przy stałej mocy w zakresie dużych prędkości obrotowych. To odgrywa fundamentalne znaczenie dla sprawności maszyny i układu jej zasilania.

Na rysunku 1 pokazano 12 biegunową maszynę o wirniku z magnesami zagnieżdżanymi w układzie dwurzędowym, którą opracowano dla dwóch głównych celów: badawczym nad nowymi typami maszyn oraz/i porównawczym z maszynami o wzbudzeniu hybrydowym w ramach grantu NCN 2015/17/B/ST8/03251, dla których opracowano i wykonano pakietowane stojany.



Rys. 1. Oś podłużna d i poprzeczna q wirnika maszyny z magnesami zagnieżdżanymi o strukturze M2M.

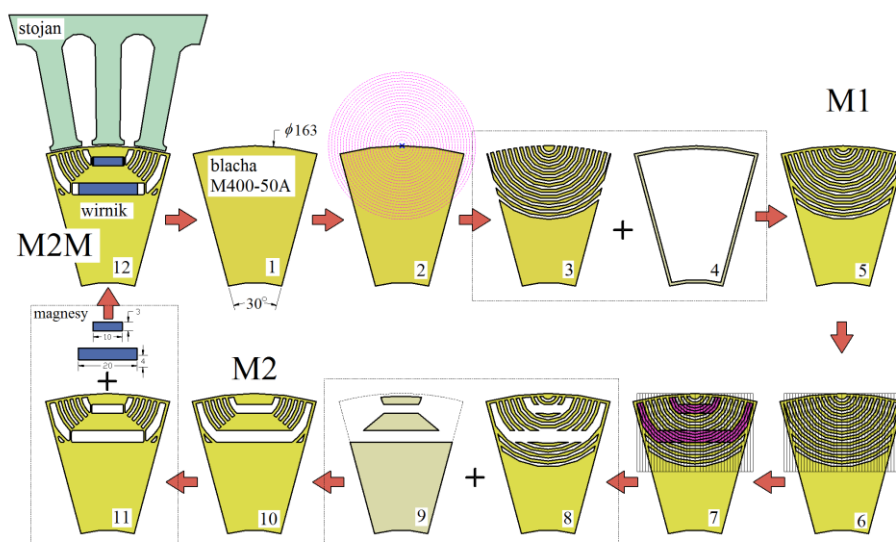
Koncepcja struktury wirnika oznaczonego M2M powstała po analizie wyników badań eksperymentalnych oraz teoretycznych maszyn synchronicznych z wirnikami z magnesami zagnieżdżanymi, zarówno tych o znanych konstrukcjach jak i rozwiązań nowatorskich. Na tej podstawie zaproponowano procedurę projektową kształtowania struktury wirnika dla maszyny o zmiennej reluktancji względem osi d i q wspomaganą magnesami, którą skrótowo opisują kroki od 1 do 12:

- Krok 1: Przyjęcie kształtu bieguna wirnika: średnica zewnętrzna blachy 163,0 mm dla założonej grubości szczeliny powietrznej 0,5 mm.
- Krok 2: Wyznaczenie 24 okręgów o środku w punkcie środkowym na średnicy zewnętrznej bieguna. Średnica najmniejszego okręgu wynosi 4,0 mm a promień każdego kolejnego jest o 1 mm większy.
- Krok 3: Utworzenie idealizowanej struktury wirnika o dużej zmienności reluktancji poprzez usunięcie co drugich obszarów wyznaczonych okręgami w kroku 2.
- Krok 4: Dodanie, ze względów technologicznych (docelowe cięcie laserem) oraz wytrzymałościowych, ramki konturowej w obrębie bieguna o grubości 1 mm.
- Krok 5: Połączenie w całość idealizowanej struktury wirnika i ramki konturowej.
- Krok 6: Przyjęcie podziału kolumnowego (ok. 1 mm) obszaru bieguna.
- Krok 7: Oszacowanie obszarów zagnieżdżenia magnesów o założonym kształcie i obszarów dodatkowych barier dla strumienia.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

- Krok 8: Utworzenie wypadkowej struktury wirnika przez wybranie wytypowanych obszarów.
- Krok 9: Dodanie, ze względów technologicznych oraz wytrzymałościowych, dodatkowych obszarów w obrębie bieguna.
- Krok 10: Połączenie dodatkowych obszarów do struktury wypadkowej.
- Krok 11: Przygotowanie struktury wirnika po dokonaniu zaokrąglenia wierzchołków powstałych otworów.
- Krok 12: Struktura wirnika z magnesami w układzie dwurzędowym przygotowana do badań symulacyjnych.

Przedstawioną procedurę projektową wirnika (dla jednego bieguna), w 12 krokach, graficznie ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Kroki tworzenia struktury wirnika z magnesami zagnieżdżanymi w układzie dwurzędowym.

Badania symulacyjne

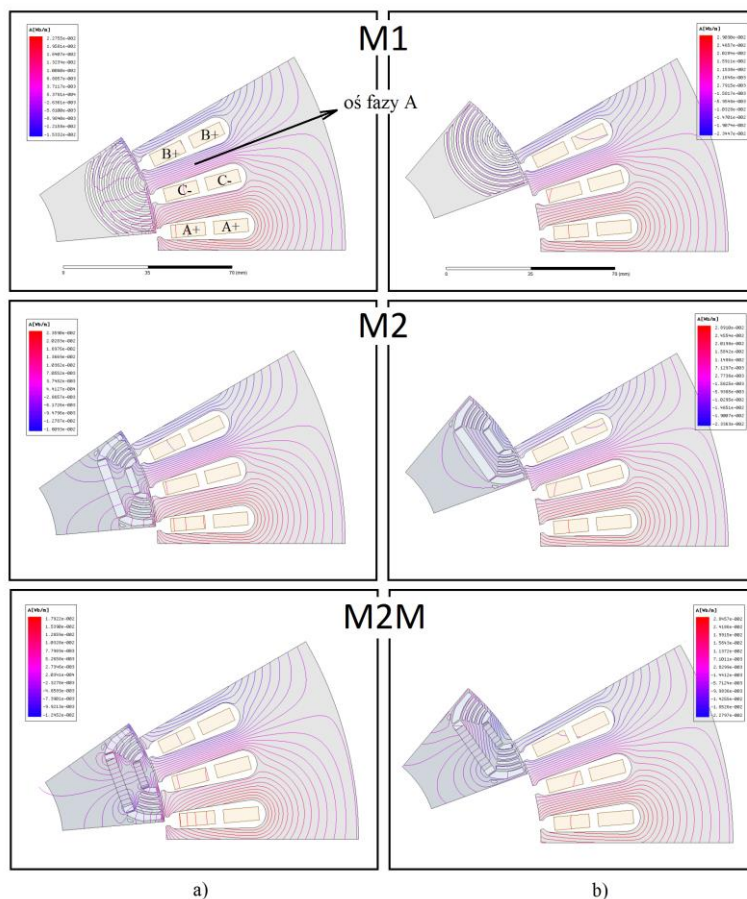
Do oceny efektywności struktury w zakresie osiągu oraz możliwości osłabiania pola wzbudzenia maszyny wykorzystano komercyjne narzędzie symulacyjne do analizy rozkładu pola magnetycznego. W tym celu opracowano dwuwymiarowe modele połowe maszyny pokazanej na rysunku 1 z wirnikiem w trzech wariantach konstrukcyjnych:

M1- wirnikiem reluktancyjny z barierami łukowymi bez udziału magnesów, o strukturze powstałej w kroku 5 procedury projektowej;

M2- wirnik reluktancyjny o dwóch powiększonych barierach magnetycznych do kształtu typowych magnesów płaskich, bez udziału magnesów, o strukturze powstałej w kroku 10 procedury projektowej;

M2M- wirnik reluktancyjny o dwóch powiększonych barierach magnetycznych z magnesami o wymiarach (szerokość x wysokość) 10×3 mm (zewnętrzny) oraz 20×4 mm (wewnętrzny) o strukturze jak w wariantcie M2.

Na rysunku 3 pokazano rozkład pola magnetycznego opracowanej struktury wirnika z magnesami (model M2M), na tle struktury bazowej M1 oraz jej struktury transformowanej (M2). Należy zwrócić uwagę, że widoczne linie pola magnetycznego powstały przy obciążeniu uzwojeń stojana prądem stałym, przy czym w uzwojeniach fazy A prąd I_A równy jest maksymalnej wartości prądu stojana $I_{smax}=180A$, a prąd w uzwojeniach fazy B i C jest dwukrotnie mniejszy tzn.: $I_B=I_C=-0,5I_{smax}$, zgodnie z rys 3. Badanie to wykazało skuteczność barierowania strumienia stojana dla położenia wirnika przy którym oś fazy A pokrywa się z osią d wirnika (rys. 3a) oraz właściwy rozkład linii pola magnetycznego przy ustawieniu wirnika przy którym oś fazy A pokrywa się z osią q wirnika (rys. 3b). Należy dodać, że przy tych położeniach wirnika wyznaczono również indukcyjności L_d oraz L_q .



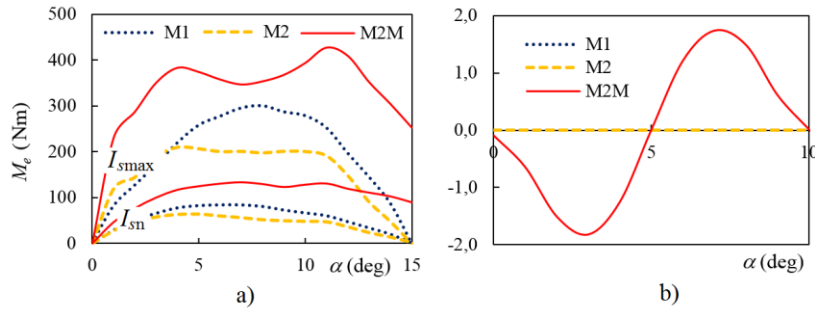
Rys. 3. Rozkład linii pola magnetycznego powstających przy obciążeniu uzwojeń stojana prądem stałym przy dwóch położeniach kątowych wirnika wyznaczających indukcyjności w osiach d (a) oraz q (b).

Na rysunku 4a przedstawiono kątową zmienność momentów elektromagnetycznych wyznaczonych na wszystkich modelach, przy opisanym wcześniej sposobie obciążenia uzwojeń prądem stałym o wartości $I_{smax}=180A$ i dodatkowo $I_{sn}=60A$. Jak widać następuje znaczne obniżenie wartości maksymalnego momentu reluktancyjnego w modelu M2

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

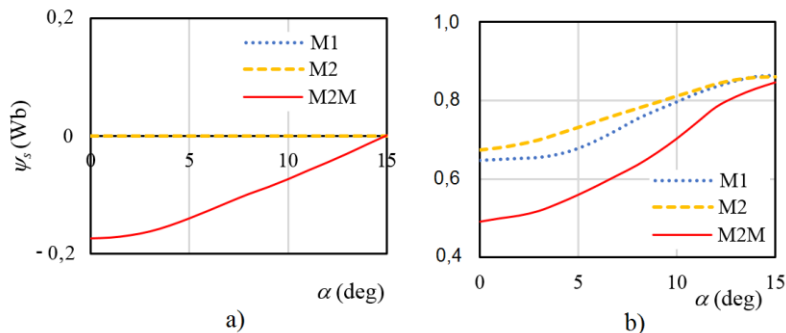
(201,4 Nm) w porównaniu z modelem M1 (301,3 Nm). Dzięki magnesom (struktura M2M) udaje się wytworzyć w modelu maksymalny moment do wartości 427,1 Nm, a bez udziału prądu I_d tj. przy $\alpha=15^\circ$ uzyskać wartość 252,7 Nm.

Na rysunku 4b przedstawiono moment zaczepowy wyznaczony w stanie bezprądowym dla trzech struktur wirnika, potwierdzając że moment występować może wyłącznie w modelu z magnesami (M2M) i że osiąga, w tym wypadku, maksymalną wartości tylko 1,8 Nm.



Rys. 4. Moment w funkcji położenia kątownego wirnika α przy obciążeniu uzwojeń stojana prądem stałym o wartości $I_{smax}=180A$ (a); w stanie bezprądowym (b).

Na rysunku 5 przedstawiono kątową zmienność strumienia skojarzonego z uzwojeniami, w tym przypadku fazy A dla wszystkich modeli w stanie bezprądowym (rys. 5a) oraz przy obciążeniu uzwojeń prądem stałym o wartości $I_{smax}=180A$ (rys 5b). Należy podkreślić, że strumienie ψ_s wyznaczone przy pozycji wirnika $\alpha=0^\circ$ oraz $\alpha=15^\circ$ pozwoliły obliczyć różnicę indukcyjności $L_d - L_q$ oraz stosunek L_q/L_d , których wartości podano w tabeli 1.



Rys. 5. Strumień skojarzony z uzwojeniami stojana w funkcji położenia kątownego wirnika α w stanie bezprądowym (a); przy obciążeniu uzwojeń stojana prądem stałym o wartości $I_{smax}=180A$ (b).

Tabela 1. Indukcyjności L_d, L_q .

model	$L_d - L_q$ (Wb)	L_q/L_d
M1	-7,2E-03	2,2
M2	-5,9E-03	1,8
M2M	-6,8E-03	2,4

Charakterystyka maszyny

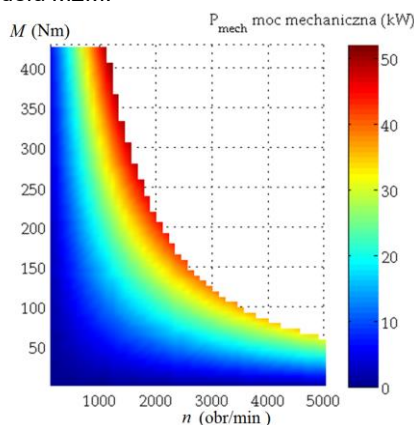
W zakresie małych prędkości obrotowych (poniżej prędkości znamionowej n_n , która jest przyjmowana za prędkość bazową) silnik elektryczny indukcyjny na zaciskach maszyny napięcie o stosunkowo niewielkiej wartości. To zapewnia dużą rezerwę napięcia U_{rez} o wartości wynikającej z różnicy maksymalnej wartości napięcia zasilania U_{smax} i napięcia indukowanego w stojanie e_s , potrzebnego do wytworzenia prądu stojana I_s . Zatem, maksymalny moment obrotowy silnika możliwy do wytworzenia, w zakresie charakterystyki stałego momentu, będzie uzależniony głównie od ograniczeń cieplnych związanych z przyjętym cyklem pracy maszyny i układu przekształtnikowego i jest zazwyczaj 2÷3 razy większy od momentu znamionowego M_n .

Tabela 2. Parametry modelu silnika z wirnikiem M2M.

U_{max}	300V
I_{sn}	60A
I_{smax}	180A ($3 \cdot I_{sn}$)
n_n	1200 obr/min
n_{max}	5000 obr/min
P_{max}	52kW
M_{max}	420 Nm

Powyżej prędkości n_n silnik zaczyna pracować przy stałej mocy, zależnej od mocy układów przekształtnikowych i wytwarza przy maksymalnej prędkości obrotowej n_{max} moment o wartości $M=M_n(n_n/n_{max})$. Optymalny stosunek prędkości n_n/n_{max} wynika z oczekiwanych osiągnięć silnika i mieści się w zakresie 1:3÷4. Poniżej znamionowej prędkości n_n , napięcie indukowane w stojanie $e_s=\psi_s \cdot \omega_s$ ma stosunkowo niewielką wartość, a to umożliwia obciążenie prądami do wartości I_{smax} . Powyżej prędkości znamionowej $\omega_s > \omega_n$, w celu utrzymania U_{rez} na wymaganym poziomie, napięcie stojana musi być obniżane poprzez zmniejszenie strumienia stojana ψ_s . Zatem strategia sterowania musi uwzględniać osłabienie pola w zakresie dużych prędkości. Realizuje się to właśnie poprzez sterowanie prądem stojana w osi d i może się to odbywać w strategii sterowania MTPA [8-9].

Na rysunku 6 przedstawiono wynik symulacji charakterystyki mechanicznej wyznaczonej przy zadanych ograniczeniach i z pominięciem strat mechanicznych, która pokazuje mapę mocy modelu M2M.



Rys. 6. Mapa mocy silnika dla modelu M2M: $R_s=0,65 \Omega$, $U_{smax}=300V$ (rms), $I_{smax}=200A$ (rms), $L_d=4,6mH$, $L_q=11,4mH$.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Do prędkości bazowej (1200 obr/min) silnik będzie mógł pracować na charakterystyce stałego momentu o wartości maksymalnej ok. 420 Nm. Powyżej tej prędkości następuje przejście w obszar stałej mocy o wartości maksymalnej ok 52 kW, która powyżej 3000 obr/min, głównie w wyniku zwiększonych strat histerezy stojana, nieco maleje. Przedstawione wyniki symulacyjne otrzymano dla pakietu stojana o długości 160 mm.

Zakończenie

W artykule zaprezentowano sposób projektowania wirnika z magnesami zagnieżdżonymi dla zastosowania w napędzie pojazdów elektrycznych. Na podstawie wyników symulacyjnych udało się potwierdzić skuteczność struktury M2M w zakresie możliwości budowy silnika pracującego w szerokim zakresie prędkości obrotowej, przy mocy ok. 50 kW. Łącznie z maksymalnym momentem na poziomie 420 Nm jest to moc wystarczająca do zapewnienia bardzo dobrej dynamiki ruchowej i maksymalnej prędkości obrotowej większości samochodów osobowych średniej klasy. Prezentowane rozwiązanie może stanowić przyczynek do dalszych prac rozwojowych nad budową silników o wysokich wymaganiach dla napędów samochodowych.

Praca finansowana w ramach środków NCN, projekt nr 2015/17/B/ST8/03251

Literatura

1. Kamiev, K.; Montonen, J.; Ragavendra, M.P.; Pyrhonen, J.; Tapia, J.A.; Niemela, M., *Design Principles of Permanent Magnet Synchronous Machines for Parallel Hybrid or Traction Applications*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, Issue: 11, pp. 4881 – 4890 (2013), DOI: 10.1109/TIE.2012.2221117.
2. Paplicki P., *Silniki magnetoelektryczne do hybrydowych napędów samochodowych*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 86 (2010), str. 101-103.
3. Amara, Y., Vido, L., Gabsi, M., et al., *Hybrid excitation synchronous machines: energy-efficient solution for vehicles propulsion*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58 (5), pp. 2137–2149, (2009).
4. Paplicki P., *Modified concept of axial-flux permanent magnet machine with field weakening capability*, Archives of Electrical Engineering, Vol. 63 (2), pp. 177–185, (2014).
5. Paplicki P., Wardach M., Bonislowski M., Palka R., *Simulation and experimental results of hybrid electric machine with a novel flux control strategy*, Archives of Electrical Engineering, vol. 64 (1), pp. 37-51, (2015).
6. Di Barba P., Bonislowski M., Palka R., Paplicki P., Wardach M., *Design of Hybrid Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51 (8), article no. 8107206, (2015).
7. Gieras J., *PM synchronous generators with hybrid excitation systems and voltage control Capabilities: A review*, XX International Conference on Electrical Machines (ICEM), Marseille, pp. 2573-2579, (2012).
8. Yu Wang; Zhiquan Deng, *Hybrid Excitation Topologies and Control Strategies of Stator Permanent Magnet Machines for DC Power System*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59 (12), pp. 4601-4616, (2012).
9. Zawirski K., *Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej (2005).

Autor: dr inż. Piotr Paplicki; Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, Wydział Elektryczny, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: piotr.paplicki@zut.edu.pl