

## Bariery magnetyczne w wirniku silnika synchronicznego z magnesami zagnieżdżanymi

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia wyniki badań symulacyjnych maszyny synchronicznej wzbudzonej magnesami trwałymi do napędu pojazdów elektrycznych. Pokazano etapy tworzenia barier magnetycznych w strukturze wirnika z magnesami zagnieżdżanymi. Na podstawie analizy polowej w przestrzeni 2D, pokazano rezultaty symulacji rozkładu pola magnetycznego, wyniki obliczeń indukcyjności oraz przebiegi momentu elektromagnetycznego otrzymane dla trzech badanych struktur wirnika. Ponadto wyznaczono charakterystykę mechaniczną projektu silnika o mocy 50 kW.

**Abstract.** The paper presents simulation results of a permanent magnet synchronous machine for EV applications. The steps of forming flux barriers in rotor structure with embedded permanent magnets have been presented. Based on 2D finite element results the magnetic field distribution, inductances and electromagnetic torque of the machine for three rotor structure design are shown. Moreover, torque characteristic of 50 kW machine design was estimated. (PM synchronous machine with flux barriers and embedded magnets in the rotor structure).

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, magnesy trwałe, napęd samochodów elektrycznych, napęd o regulowanej prędkości.

**Keywords:** electrical machines, permanent magnets, electric vehicle drive, variable speed application.

### 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 wiele uwagi poświęca się maszynie elektrycznej. Od niej wymaga się wysokich osiągnięć w małej objętości, co spełnić można jedynie wytwarzając silniki wysokobrotowe o prędkościach sięgających kilkunastu tysięcy 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 sposobem chłodzenia [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 (w większości przypadków wzbudzone magnesami) o 4 lub 6 biegunach.

Należy ponadto dodać, że obecnie, intensywnie prowadzone są badania maszyn wzbudzonych hybrydowo które mają zapewnić szeroki zakres regulacji prędkości i wymaganą dużą sprawność [3-7].

W artykule przedstawiono sposób tworzenia barier dla strumienia magnetycznego w wirniku 12 biegunowej maszyny z zagnieżdżanymi magnesami trwałymi w układzie dwurzędowym (rys.1). Należy podkreślić, że przyjęta w tym przypadku duża ilość biegunów wynikała z konieczności dopasowania wirnika do gotowego stojana maszyny o wzbudzaniu hybrydowym, opracowanej i wykonanej w ramach grantu NCN 2015/17/B/ST8/03251, i planowanych badań porównawczych różnych typów maszyn.

Artykuł jest rozszerzoną wersją materiału konferencyjnego prezentowanego 22 kwietnia 2016 r. w Łagowie na IX Konferencji Naukowo-Technicznej Innowacyjne Materiały i Technologie w Elektrotechnice i MITEL 2016 "Innowacje szansą rozwoju gospodarki".

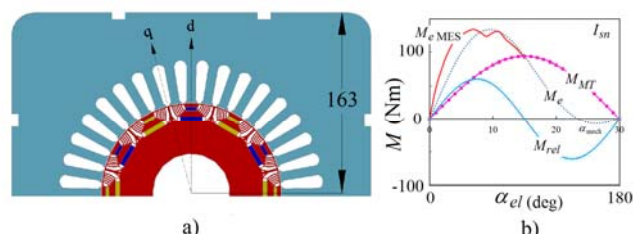
### Struktura wirnika

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  $q$  (rys.1a). Różnica między indukcyjnościami uzwojeń stojana w osi podłużnej  $L_d$  i poprzecznej  $L_q$  daje moment reluktancyjny. Maszyna wytwarzać będzie moment elektromagnetyczny  $M_e$  będący składową momentu  $M_{MT}$ -

powstałego w wyniku oddziaływania strumienia sprzężonego  $\Psi_{MT}$  wzbudzonego magnesami i prądu stojana w osi poprzecznej  $i_q$  oraz momentu reluktancyjnego  $M_{rel}$ . Moment elektromagnetyczny można zatem opisać równaniem 1.

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

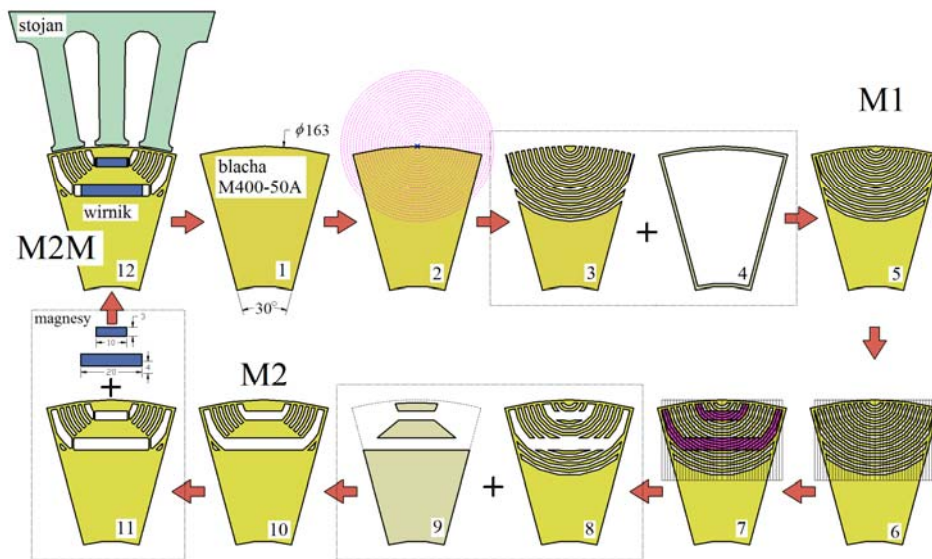
Z równania momentu (1) wynika również to, że im większa różnica w indukcyjnościach  $L_d - L_q$  tym skuteczniej można osłabiać strumień skojarzony z uzwojeniami stojana  $\Psi_s$  prądem w osi podłużnej  $i_d$ , podczas pracy silnika przy stałej mocy w zakresie dużych prędkości obrotowych. To ma istotne znaczenie dla pracy maszyny przy wysokich prędkościach, sprawności maszyny i układu jej zasilania.



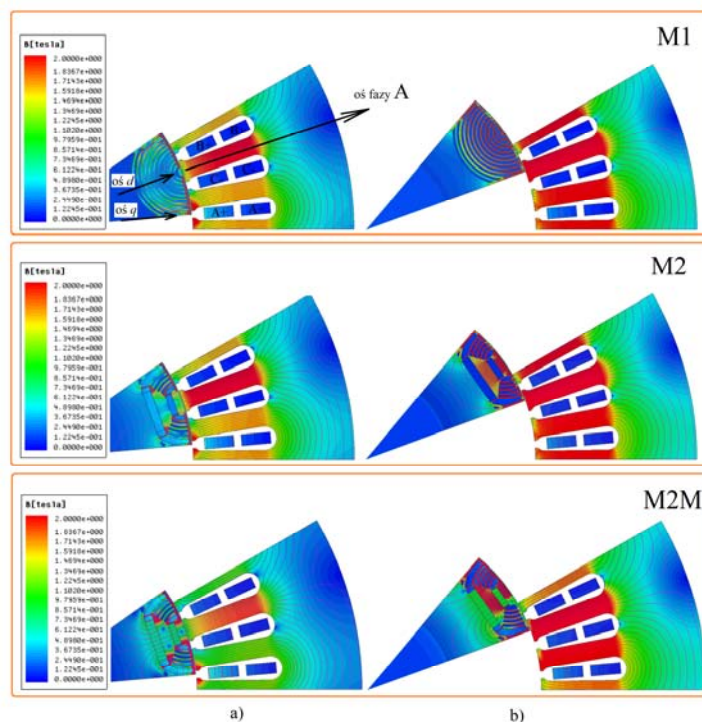
Rys.1. Struktura M2M (a) oraz przebiegi momentu (b) silnika synchronicznego z magnesami zagnieżdżanymi

Na rysunku 1b przedstawiono przebieg momentu  $M_e$  oraz jego składowych  $M_{MT}$  oraz  $M_{rel}$  otrzymany na podstawie równania (1) przy obciążeniu uzwojeń silnika prądem stałym o wartości znamionowej  $I_{sn}$ . Dodatkowo, na rysunku pokazano przebieg momentu elektromagnetycznego uzyskany w wyniku analizy polowej  $M_e^{MES}$ . 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 skrótkowo 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.
- 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



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

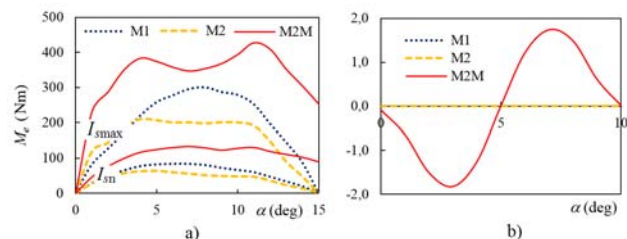
## Badania symulacyjne

Opracowaną strukturę wirnika poddano badaniom symulacyjnym w zakresie przewidywanych osiągnięć oraz możliwości osłabiania pola wzbudzenia maszyny. W tym celu wykorzystano komercyjne narzędzie symulacyjne do analizy rozkładu pola magnetycznego. Opracowano dwuwymiarowe modele połowe maszyny pokazanej na rysunku 3 z wirnikiem w trzech wariantach:

- M1- wirnik 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) 10x3mm (zewnątrzny) oraz 20x4mm (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 przekształconej (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. 3a model M1. Badanie to pokazało 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 również wyznaczono indukcyjności  $L_d$  i  $L_q$ .

Na rysunku 4a przedstawiono kątową zmienność  $M_e$  badanego we wszystkich trzech modelach, przy opisanym wcześniej sposobie obciążenia uzwojeń stojana prądem stałym o wartości  $I_{smax}=180A$  i dodatkowo  $I_{sn}=60A$ . Jak widać następuje znaczne obniżenie wartości maksymalnego momentu reluktancyjnego w modelu M2 (201,4 Nm) w porównaniu z modelem M1 (301,3 Nm). Dzięki magnesom udaje się wytworzyć w modelu M2M maksymalny moment do wartości 427,1 Nm, a bez udziału prądu  $I_d$  tj. przy  $\alpha=15^\circ$  uzyskać wartość 252,7 Nm.

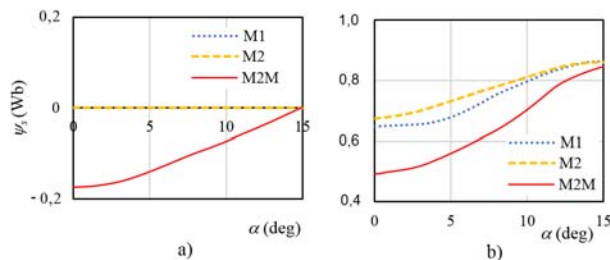


Rys.4. Moment w funkcji położenia kąowego wirnika  $\alpha$ : przy obciążeniu uzwojeń stojana prądem stałym o wartości  $I_{sn}=60A$ ,  $I_{smax}=180A$  (a) oraz w stanie bezprądowym (b)

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

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  $\psi_s$  wyznaczone, w tym zapisie 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 kąowego wirnika  $\alpha$  w stanie bezprądowym (a); przy obciążeniu uzwojeń stojana prądem stałym o wartości  $I_{smax}=180A$  (b)

Dla modelu M2M udało się uzyskać stosunek  $L_q/L_d=2,4$  co będzie gwarantować skuteczne odwzbudzenie pola magnetycznego od magnesów trwałych prądem w osi podłużnej.

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

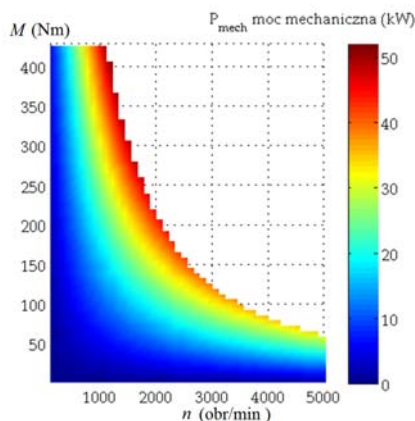
## Charakterystyka mechaniczna

W zakresie małych prędkości obrotowych (poniżej prędkości znamionowej  $n_n$ , która jest przyjmowana za prędkość bazową) silnik indukuje na zaciskach 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 zazwyczaj w zakresie 1:3-1:4. Poniżej znamionowej prędkości  $n_n$ , napięcie indukowane w stojanie  $e_s=\psi_s \cdot \omega_s$  ma stosunkowo niewielką wartość, a to umożliwiła 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  $\psi_s$ . 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].



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

Na rysunku 6 przedstawiono wynik symulacji mapy mocy otrzymanej dla modelu M2M.

Pokazana charakterystyka mechaniczna wyznaczona została przy zadanych ograniczeniach i z pominięciem strat mechanicznych.

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 histerezowych stojana, nieco maleje. Przedstawione wyniki symulacyjne otrzymano dla pakietu stojana o długości 160 mm.

#### Zakończenie

W artykule zaprezentowano sposób projektowania struktury wirnika z magnesami zagnieżdżonymi dla silnika wysokoobrotowego do zastosowania w napędzie pojazdów elektrycznych. Na podstawie wyników symulacyjnych udało się potwierdzić skuteczność prezentowanej struktury M2M w zakresie możliwości budowy silnika pracującego w szerokim zakresie prędkości obrotowej, przy mocy ok. 50 kW. Jest to moc silnika która z maksymalnym momentem obrotowym 420 Nm zapewni bardzo dobrą dynamikę ruchową i wystarczająco dużą prędkość dla 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

**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](mailto:piotr.paplicki@zut.edu.pl)

#### 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, (2013), pp. 4881–4890
- [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), (2009), pp. 2137–2149
- [4] Paplicki P., Modified concept of axial-flux permanent magnet machine with field weakening capability, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 63 (2), (2014), pp. 177–185
- [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), (2015), pp. 37-51
- [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), (2015), article no. 8107206
- [7] Gieras J., PM synchronous generators with hybrid excitation systems and voltage control Capabilities: A review, *XX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Marseille, (2012), pp. 2573-2579
- [8] Yu Wang; Zhiqian Deng, Hybrid Excitation Topologies and Control Strategies of Stator Permanent Magnet Machines for DC Power System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59 (12), (2012), pp. 4601-4616
- [9] Zawirski K., Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych. *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej* (2005)