

**Tomasz Kądziołka**  
BOBRME KOMEL, Katowice

## MODELOWANIE SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI O UZWOJENIACH SKUPIONYCH

### MODELING OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH CONCENTRATED WINDINGS

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia konstrukcję obwodu elektromagnetycznego 8-biegunowego silnika synchronicznego z magnesami o uzwojeniu skupionym. W artykule zaprezentowano model obliczeniowy silnika PMSM, pokazano rozkład indukcji magnetycznej oraz linii strumienia magnetycznego w przekroju poprzecznym maszyny, zaprezentowano obliczeniowe wartości momentu elektromagnetycznego silnika.

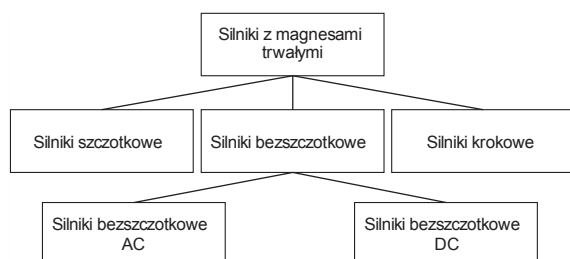
**Abstract:** This paper presents the construction of electromagnetic circuit of 8-pole permanent-magnet synchronous motor with concentrated windings. The computational model of 8-pole permanent-magnet synchronous motor, induction and flux lines in a cross section are shown. Results for full and reduced model are presented.

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, PMSM, silnik synchroniczny z magnesami, magnesy

**Keywords:** electrical machines, PMSM, permanent magnet, PM, synchronous motor

#### 1. Wstęp

Dynamiczny rozwój przemysłu produkującego magnesy trwałe z domieszkami pierwiastków ziem rzadkich przyczynił się do znaczącego rozwoju wirujących maszyn elektrycznych. Magnesy trwałe są obecnie stosowane w silnikach zarówno małej jak i dużej mocy do kilkuset kW, co z tym się wiąże od kilkunastu lat zauważyć można wypieranie silników indukcyjnych zasilanych z przekształtników energoelektronicznych silnikami z magnesami trwałymi. Silniki z magnesami trwałymi podzielić można według klasyfikacji przedstawionej na rysunku 1.

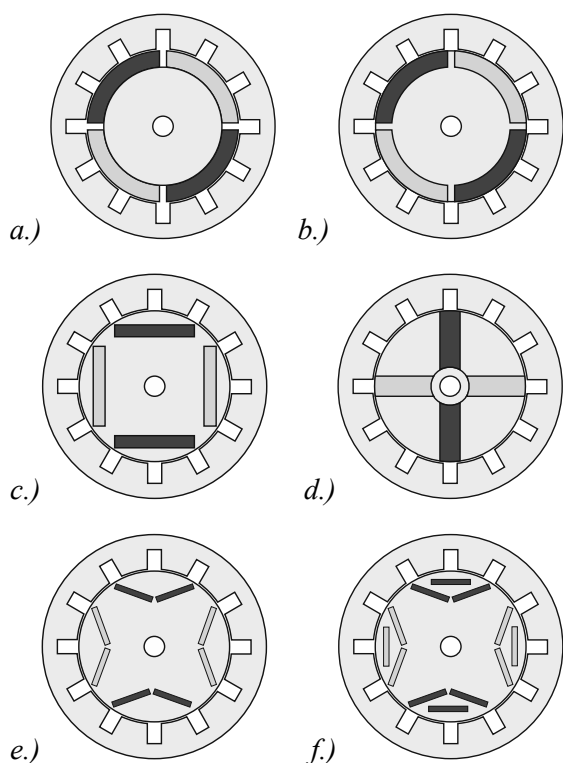


Rys. 1. Klasyfikacja silników z magnesami trwałymi [1]

Nowoczesne silniki PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) z magnesami neodymowymi NdFeB cechują się m.in. najwyższą sprawnością spośród wirujących maszyn elektrycznych oraz dużą przeciążalnością momentem [2][3][4][5][6].

Silniki te ze względu na konstrukcję wirnika możemy podzielić na silniki z wirnikiem zewnętrznym oraz wewnętrznym. Podział maszyn na maszyny z wirnikiem zewnętrznym oraz wewnętrznym jest ściśle związany z jego zastosowaniem, np. silnik w kole pojazdu elektrycznego. Silniki z wirnikiem wewnętrznym ze względu na konstrukcję wirnika możemy podzielić na silniki PMSM z magnesami umieszczonymi na powierzchni (z ang. Surface Permanent Magnet Synchronous Motor - SPMSM) oraz na silniki z magnesami umieszczonymi wewnątrz wirnika (z ang. Interior Permanent Magnet Synchronous Motor - IPMSM). Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne wirników z magnesami trwałymi przedstawiono na rys. 2. Silniki PMSM z magnesami umieszczonymi na powierzchni (SPMSM) charakteryzują się zbliżoną wartością reaktancji w osiach d i q, stosunek reaktancji jest zbliżony do jedności  $X_d \approx X_q$ . Dla silników z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika stosunek reaktancji w osiach d i q jest różny od jedności  $X_d \neq X_q$ . Warto nadmienić, że obie konstrukcje wirnika (SPMSM oraz IPMSM) różnią się również grubością szczeliny powietrznej, różnica ta wynika z faktu, że magnesy umieszczone na powierzchni muszą być dodatkowo zabezpieczone przed działaniem siły odśrodkowej poprzez ich bandażowanie. Na rysunku 2

przedstawiono wybrane konstrukcje wirników maszyn z magnesami trwałymi [3][4]. Jak wspomniano wcześniej kluczową rolę w silniku PMSM odgrywają magnesy trwałe, ponieważ to od materiału z jakiego został on wykonany zależą m.in. jego parametry. Podczas projektowania dąży się do zastosowania magnesów o jak największej indukcji remanentu oraz natężeniu koercji. W ramach artykułu przedstawione zostały dwa modele obliczeniowe - pełny oraz zredukowany. Następnie dla znamionowej wartości prądów silnika  $I_{RMS}=90A$  przeprowadzono obliczenia, a wyniki porównano na wykresie.

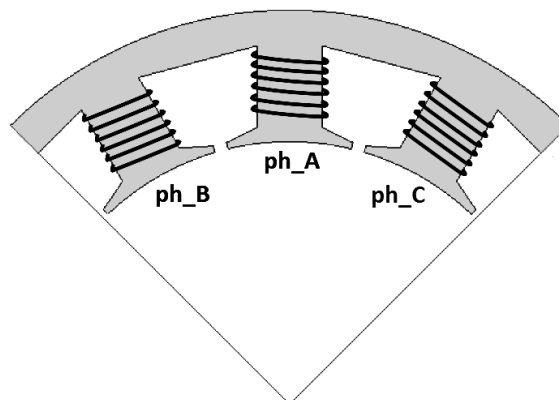


Rys. 2. Przykładowe konstrukcje wirników maszyn z magnesami trwałymi: Surface - magnesy mocowane na powierzchni (a), Inset - magnesy zagłębione w wirniku (b), Interior - magnesy umieszczone wewnątrz wirnika (c - f)

## 2. Model obliczeniowy

Model obliczeniowy silnika PMSM został opracowany i przygotowany w środowisku obliczeniowym Maxwell 2D. Maxwell 2D jest zaawansowanym programem do obliczeń elektromagnetycznych wykorzystującym metody elementów skończonych. Zaprojektowany silnik jest silnikiem z magnesami trwałymi o uzwojeniu z cewkami skupionymi. Uzwojenie to charakteryzuje się poskokiem uzwojenia

$y=1$ . Rysunek nr 3 prezentuje przykładowe użycie stojana silnika z cewkami skupionymi. Cechą charakterystyczną nowo opracowanego silnika jest nierówna szczelina powietrzna, ukształtowana tak, aby zoptymalizować go pod kątem indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej. Kształt indukcji w szczelinie zbliżony jest do sinusoidy.



Rys. 3. Rysunek poglądowy przedstawiający wycinek stojana silnika PMSM z cewkami skupionymi

Do zalet silników z uzwojeniem skupionym można zaliczyć [7][8]:

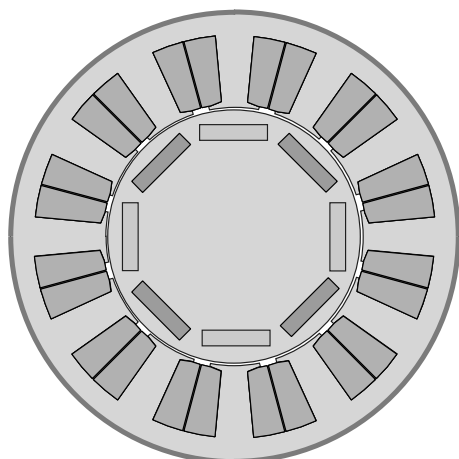
- mniejsze zużycie miedzi (uzwojenie),
- ograniczenie momentu zaczepowego (mniejsze otwarcie żłobka),
- obniżenie strat w miedzi zachowując tę samą moc,
- wyższa sprawność silnika,
- krótszy kadłub, dzięki zmniejszeniu wysięgu czół (długości zezwoju),
- zmniejszenie masy całego silnika (krótszy kadłub oraz długość zezwoju).

Zaprojektowany silnik posiada 12 żłobków w stojanie ( $N_s=12$ ) oraz 8-biegunów magnetycznych rozłożonych równomiernie na obwodzie wirnika ( $2p=8$ ), jest to wirnik z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika (IPMSM), dodatkowo blacha wirnika została zoptymalizowana pod kątem zasilania prądem sinusoidalnym.

Tabela 1. Wybranych parametry modelu silnika

Liczba żłobków stojana $N_s$	12
Liczba par biegunów $2p$	4
Poskok uzwojenia $y$	1
Liczba żłobków na biegun i fazę	0,5

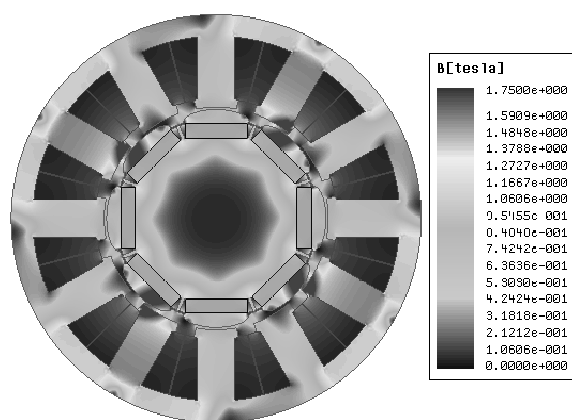
Pełny model obliczeniowy silnika przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Model obliczeniowy silnika PMSM

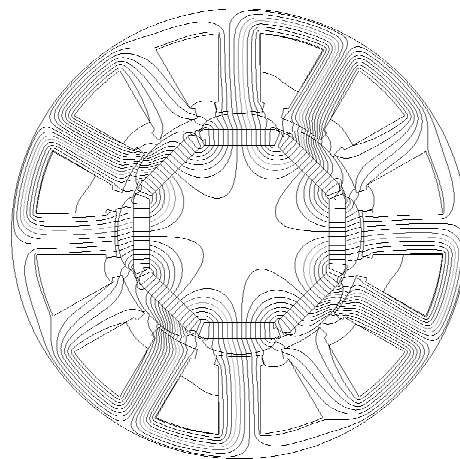
### 3. Wyniki obliczeń

Obliczenia przeprowadzono dla pełnego modelu silnika z cewkami skupionymi. Wynikiem symulacji jest przebieg momentu elektromagnetycznego silnika dla różnych wymuszeń prądowych przy prędkości  $750\text{obr}/\text{min}$  w funkcji czasu. Czas symulacji przyjęto na poziomie  $40\text{ms}$ . Na rysunku 5 pokazano rozkład indukcji magnetycznej w poszczególnych częściach obwodu elektromagnetycznego silnika.



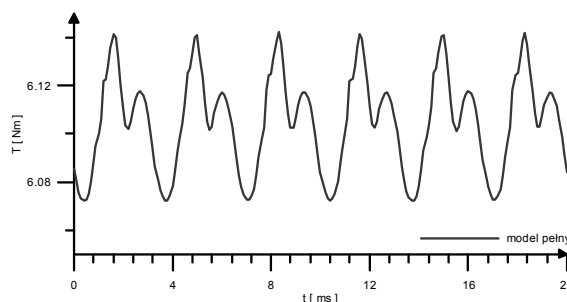
Rys. 5. Rozkład indukcji magnetycznej silnika dla modelu pełnego

Analizując wartości indukcji magnetycznej w maszynie zauważyć można, że indukcja w zębie stojana nie przekracza wartości  $1,6\text{T}$  oraz bardzo szybko nasycają się mostki pomiędzy biegunami wirnika, co jest zjawiskiem pożądanym. Rysunek 6 prezentuje rozkład strumienia magnetycznego w rdzeniu silnika, rozkład linii strumienia magnetycznego w przekroju poprzecznym potwierdza, że model silnika został wykonany poprawnie.



Rys. 6. Linie strumienia magnetycznego w przekroju poprzecznym silnika dla modelu pełnego

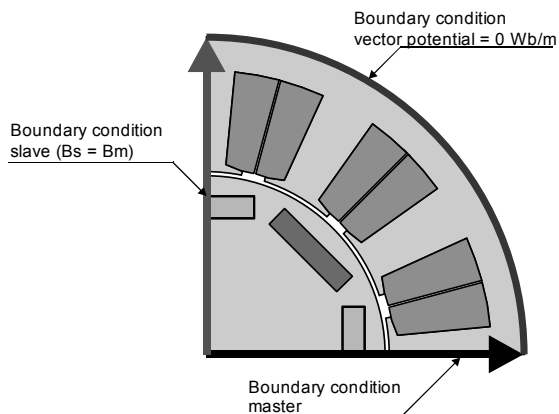
W celu weryfikacji momentu, jaki wytwarza silnik przeprowadzono symulacje, których wynikiem jest przebieg momentu zaprezentowany na rysunku 7.

Rys. 7. Przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego silnika dla modelu pełnego  $I_{RMS}=90\text{A}$ 

Na powyższym rysunku zaprezentowano wartość momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik wirujący z prędkością  $750\text{obr}/\text{min}$  przy wymuszeniu prądem znamionowym o wartości  $I_{RMS}=90\text{A}$  (rys. 7). Z obliczeń wynika, że przy prądzie znamionowym  $I_{RMS}=90\text{A}$  silnik wytwarza moment o wartości  $T=6,1\text{Nm}$ .

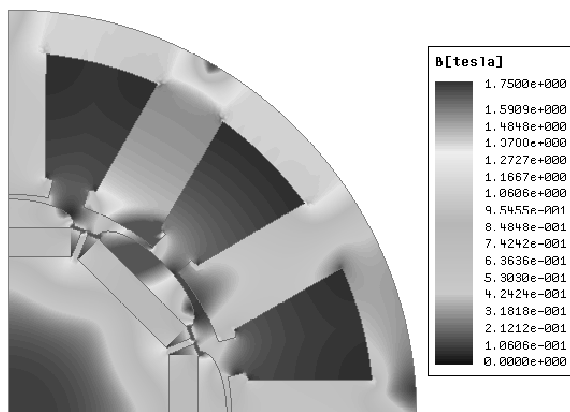
Następnym krokiem projektowym było przeprowadzenie redukcji modelu w celu przyśpieszenia czasu obliczeń elektromagnetycznych. W obliczeniach MES (metoda elementów skończonych) znaczącą rolę odgrywa czas obliczeń. Wraz ze wzrostem złożoności modelu oraz wzniosu mechanicznego modelowanej maszyny znacząco wzrasta czas obliczeń (większa liczba elementów skończonych modelu).

Dlatego też dąży się do uproszczenia modelu poprzez wykorzystanie symetrii pola magnetycznego w maszynie. Analizując rozptyw strumienia w modelu zauważyć można powtarzalność zjawisk fizycznych zachodzących w maszynie. Wykorzystanie symetrii pozwala znacząco zredukować model obliczeniowy. W wypadku prezentowanego w artykule silnika można ograniczyć model do 1/4 modelu pełnego. Aby wyniki obliczeń były prawidłowe należy zadać odpowiednie warunki brzegowe na krawędziach modelu oraz uwzględnić, że otrzymane wyniki są dla 1/4 modelu. Na rysunku 8 zaprezentowano model połowy z odpowiednio zadanymi warunkami brzegowymi.

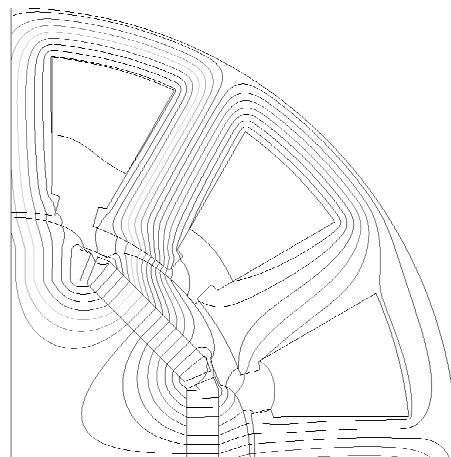


Rys. 8. Zredukowany model silnika z odpowiednio zadanymi warunkami brzegowymi

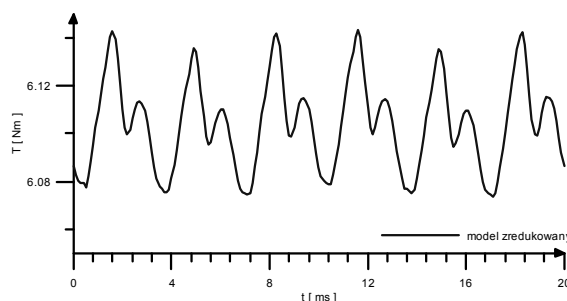
Po przygotowaniu modelu zredukowanego powtórzono symulacje podobnie jak miało to miejsce dla modelu pełnego. Poniżej zaprezentowano wyniki obliczeń dla modelu zredukowanego wraz z rozkładem linii strumienia oraz indukcji magnetycznej.



Rys. 9. Rozkład indukcji magnetycznej silnika dla modelu zredukowanego

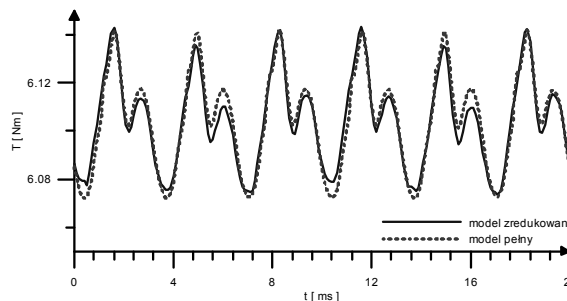


Rys. 10. Linie strumienia magnetycznego w przekroju poprzecznym silnika dla modelu zredukowanego



Rys. 11. Przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego silnika dla modelu zredukowanego

W kolejnym etapie pracy porównano wyniki obliczeń elektromagnetycznych dla modelu pełnego oraz zredukowanego. Na rysunku 12 przedstawiono porównanie wyników obliczeń otrzymanych w programie Maxwell 2D, tętnienia momentu dla prądu  $I_{RMS}=90A$  wynoszą poniżej 1,15%, a wartość średnia momentu wynosi  $T=6,1Nm$ .



Rys. 12. Porównanie wartości momentu dla modelu pełnego oraz zredukowanego przy prądzie  $I_{RMS}=90A$

Program Maxwell 2D umożliwia podgląd takich parametrów przeprowadzonych symulacji jak czasu obliczeń oraz liczby elementów

wygenerowanej siatki modelu, wybrane parametry zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Tabela przedstawiająca czasy obliczeń oraz liczbę elementów siatki dla modelu pełnego oraz zredukowanego

	<i>Model pełny</i>	<i>Model zredukowany</i>
<i>Czas symulacji</i>	40 ms	40 ms
<i>Krok symulacji</i>	0,1 ms	0,1 ms
<i>Liczba kroków symulacji</i>	400	400
<i>Liczba elementów siatki</i>	45 477	13 314
<i>Czas obliczeń</i>	25min 45sec	7min 59sec

W tabeli 2 zestawiono porównanie czasów obliczeń dla modelu pełnego oraz zredukowanego, jak również liczbę elementów siatki dla poszczególnych modeli. Redukcja modelu znacząco przyspiesza czas obliczeń.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Celem niniejszej pracy było opracowanie i zaprojektowanie modelu silnika synchronicznego z magnesami trwałymi i uzwojeniem skupionym. Analizując otrzymane wyniki obliczeń zauważyć można, że wyniki dla modelu pełnego oraz zredukowanego są praktycznie takie same, średnia wartość momentu wynosi  $T=6,1Nm$ . Różnica pomiędzy kształtem przebiegów oraz wartością momentu (chwilowa wartość) może wynikać z różnicy w siatkach poszczególnych modeli, a przede wszystkim siatki w szczeliny powietrznej. Analizując czasy obliczeń dla 40ms symulacji (tabela 2) widać znaczącą różnicę pomiędzy modelem pełnym, a zredukowanym, różnica ta jest ponad trzykrotna. I tak w czasie około 26 minut, jakie są wymagane do zasymulowania 40ms odpowiedniego stanu pracy silnika dla pełnego modelu, w zredukowanym otrzymamy ponad 120ms. Z punktu widzenia symulacji czasowej (transient), różnica nie jest tak wielka. Gdyby założyć, że nasz model chcielibyśmy użyć do przeprowadzenia kosymulacji tj. zamodelować część energoelektroniczną w programie Ansys Simplorer, a następnie sterować modelem polewym silnika wykonanym w programie Maxwell (symulacja pomiędzy dwoma programami), każda minuta symulacji odgrywałaby istotną rolę.

#### 5. Literatura

- [1]. Michna M.: *Projekt silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi*. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2010.
- [2]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Politechnika Śląska, Gliwice, 2002.
- [3]. Hanselman D.: *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. Magna Physics Publishing, 2006.
- [4]. Kirshnan R.: *Electric Motor Drives*. Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [5]. Miller T.J.E.: *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. Oxford, 1989.
- [6]. Ellis G.: *Control System Design Guide*. Elsevier Academic Press, 2004.
- [7]. Bianchi N., Bolagnani S., Dai Pre M.: *Magnetic Loading of Fractional-Slot Three-Phase PM Motors With Nonoverlapped Coils*. IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 44, No.5, September/October 2008.
- [8]. Cross J., Viarouge P.: *Synthesis of High Performance PM Motors With Concentrated Windings*. IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 2, June 2002.

#### Autor

mgr inż. Tomasz Kądziołka  
 Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL,  
 40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188  
 e-mail: t.kadziolka@komel.katowice.pl

#### Informacje dodatkowe

Niniejszy artykuł został napisany na podstawie materiałów zgromadzonych w trakcie pisania pracy dyplomowej i jest zbiorem doświadczeń i przemyśleń autora.