

**Damian MAZUR**

POLITECHNIKA RZESZOWSKA,  
ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów

## Analiza momentu zaczepowego oraz indukcji magnetycznej w szczelinie dla prądnicy synchronicznej metodą MES

Dr inż. Damian MAZUR

Pracuje w Zakładzie Podstaw Elektrotechniki i Informatyki Politechnik Rzeszowskiej na stanowisku adiunkta. W pracy dydaktycznej zajmuje się diagnostyką urządzeń elektromechanicznych (obliczeniami i pomiarami maszyn elektrycznych), metodami numerycznymi (metodą elementów skończonych, brzegowych), programowaniem obiektowym i bazami danych.



e-mail: mazur@prz.edu.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę wpływu wartości magnetycznych magnesów trwałych osadzonych na wirniku na niektóre parametry statyczne prądnicy synchronicznej. Obliczenia momentu zaczepowego oraz indukcji magnetycznej zostały wykonane przy różnych sposobach modelowania. Zbadano również jaki wpływ ma długość pakietu generatora na moment zaczepowy oraz indukcję magnetyczną. Wyniki analiz porównano z pomiarami dokonanymi na rzeczywistym modelu prądnicy.

**Słowa kluczowe:** moment zaczepowy, prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi, metoda elementów skończonych.

### Analysis of the cogging torque and flux density in the gap for a synchronous generator using the FEM method

#### Abstract

The paper deals with the influence of magnetic values of permanent magnets placed at the rotor on some static parameters of a synchronous generator. Calculations of the cogging torque and flux density were made using various ways of modelling. The influence of the generator package length on the cogging torque and flux density was also examined. The analysis results were compared with the measurements taken on the generator real model. The research carried out on models showed that the most accurate calculations were obtained in the module RMxpert. RMxpert software speeds the design and optimization process of rotating electric machines. It allows users to create model, assign materials, running strategies, and drive circuit to calculate machine performance characteristics. Also, RMxpert can automatically set-up a complete Maxwell project including geometry, motion, and mechanical set-up, material properties, core loss, winding and source set-up. This is due to the fact that the calculations made in RMxpert are based on the analytical models which give more similar results to those obtained from measurements. It can also be noted that the cogging torque is lower for modelling the magnet 3 length, while in the case of application of three magnets arranged in diagonal length, the torque decreases significantly.

**Keywords:** cogging torque, permanent magnet synchronous motors, finite element method.

## 1. Wprowadzenie

W celu uzyskania energii elektrycznej z energii wiatru, powstało wiele rodzajów koncepcji generatora. W niniejszej pracy zostały one zaprojektowane przez Prof. Z. Gorycę z Politechniki Radomskiej [2, 3]. Prądnice z magnesami trwałymi są najczęściej wykorzystywane w elektrowniach wiatrowych. Maszyny te oferują wysoką sprawność w działaniu, mają solidną konstrukcję, oraz posiadają wysoką jakość i niezawodność [1].

Ostatnie badania [2, 3, 4] pokazują że jest duże zapotrzebowanie na generatory wiatrowe. Generatory asynchroniczne budowane są jako maszyny o zmiennej liczbie par biegunów [5]. Celem niniejszego badania jest analiza momentu zaczepowego i indukcji ma-

gnetycznej w szczelinie prądnicy synchronicznej w zależności od własności materiałowych magnesów stałych. Analiza ta została dokonana metodą elementów skończonych w systemie ANSOFT Maxwell

## 2. Budowa prądnicy

Analizowana prądnica ma 16 magnesów na wirniku odpowiadających ośmiu parom biegunów. Analizę wykonano dla następujących założeń obwodu magnetycznego: Liczba biegunów  $2p = 16$ .

Dane obwodu magnetycznego stojana oraz wirnika zostały zawarte w tabeli 1. Wirnik został zamodelowany jako stalowa rura na której zostały osadzone magnesy trwałe.

Tab. 1. Dane obwodu magnetycznego  
Tab. 1. The magnetic circuit parameters

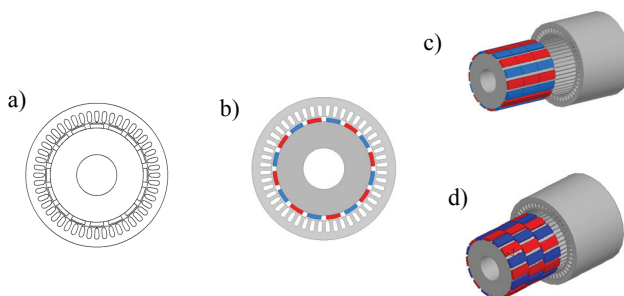
		Stojan	Wirnik
$D_z$	Średnica zewnętrzna	208 mm	137 mm
$D_w$	Średnica wewnętrzna	151 mm	60 mm
Q	Liczba zębów	48	-
g	Szczelina powietrzna	1,5 mm	
$D_l$	Długość pakietu generatora	150 mm	

## 3. Model obliczeniowy

Oprogramowanie ANSOFT Maxwell daje możliwość łatwego modelowania elementów maszyn elektrycznych z wykorzystaniem biblioteki systemowej RMxpert oraz modeli MES 2D i 3D. Przy użyciu tego programu wykonano obliczenia momentu zaczepowego oraz indukcji magnetycznej w szczelinie przy pomocy różnych sposobów modelowania, wymienionych powyżej. Analizowane modele prądnicy przedstawiają rys. 1a, 1b, 1c, 1d. Dla uproszczenia obliczeń przyjęto że stojan oraz wirnik wykonane są z jednolitego materiału. Dla wirnika i stojana przyjęto materiał stal M19-24G. Krzywa nasycania B-H dla stali M19-24G została przedstawiona na rys. 2. Do zamodelowania magnesów należy wprowadzić długość, grubość oraz współczynnik wypełnienia podziałki biegunowej. W celu przeliczenia rozpiętości kątowej magnesów na współczynnik wypełnienia podziałki biegunowej posłużono się następującym wzorem:

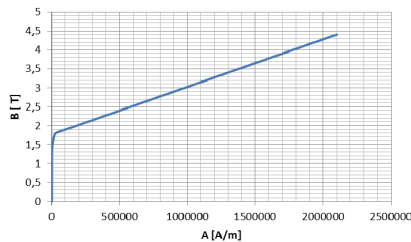
$$P_E = \frac{\alpha \cdot i}{360} = 0,73 \quad (1)$$

gdzie:  $i$  - liczba magnesów.



Rys. 1. a) Analizowany model wygenerowany przez system RMxpert; b) Analizowany model 2D; c) Analizowany model 3D-I; d) Analizowany model 3D-II

Fig. 1. a) The analyzed model generated by the RMxpert system; b) The analyzed 2D model; c) The analyzed 3D model - I; d) The analyzed 3D model - II



Rys. 2. Krzywa nasycenia dla stali M19-24G  
Fig. 2. Saturation curve for M19-24G steel

## 4. Materiał oraz podstawowe dane magnesów wirnika

Właściwości materiałów stosowanych w maszynach ma duży wpływ na ich parametry. Magnesy samarowo-kobaltowe (Sm-Co) były pierwszymi z grupy nowoczesnych magnesów które wprowadzono do produkcji masowej. Są one produkowane metodami metalurgii proszków, z reguły jako magnesy anizotropowe.

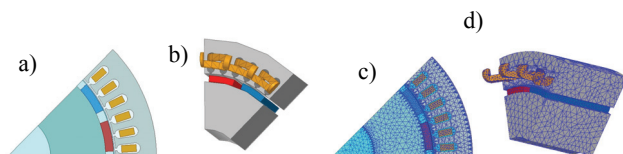
Popularne magnesy neodymowe są obecnie najsilniejszymi magnesami stosowanymi w maszynach synchronicznych. Zapotrzebowanie na ten materiał wynika z jego znakomitych właściwości magnetycznych które umożliwiają uzyskanie pożądanych parametrów. W tabeli 2 przedstawiono 4 rodzajów magnesów, których użyto do analizy, w tym również magnes N38SH który został użyty przy wykonaniu realnego modelu.

Tab. 2. Rodzaje magnesów oraz ich właściwości magnetyczne  
Tab. 2. Types of magnets and their magnetic properties

Nr	Material	Mu	Hc [A/m]	Br [T]	Mp [A/m]
1	SmCo24	1,06	-756000	1,01	803732
2	SmCo28	1,03	-820000	1,07	851478
3	NdFe30	1,04	-837999	1,10	875352
4	N38SH	1,08	-835000	1,14	907183

## 5. Opis modelu MES

Model 2D oraz 3D-I stworzono dla wycinka obejmującego 1 parę biegunów tj. 45°. Daje to możliwość znacznego skrócenia czasu obliczeń. Dla takiego modelu należy zastosować odpowiednie warunki brzegowe symulujące symetrię cykliczną. Wycinek modelu 2D przedstawiono na rys. 3a natomiast 3D na rys.3b. Wygenerowane siatki MES dla tych modeli przedstawiono na rys.3c oraz 3d. W sumie model 2D zawiera 3703 elementów typu Tria. Model 3D zawierał 224446 elementów typu Tet. Obliczenia dla modelu 3D-II oraz 3D-III zostały dokonane dla całego modelu. Model ten zawierał 895721 elementów typu Tet.



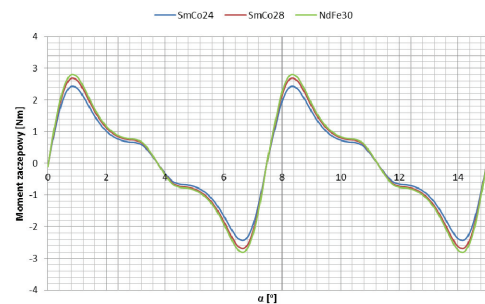
Rys. 3. a) Wycinek modelu 2D, b) Wycinek modelu 3D;  
Fig. 3. a) The segment of 2D model, b) The segment of 3D model;  
c) FED grid for 2D model; d) FED grid for 3D model

## 6. Wyniki obliczeń

### 6.1. Moment zaczepowy

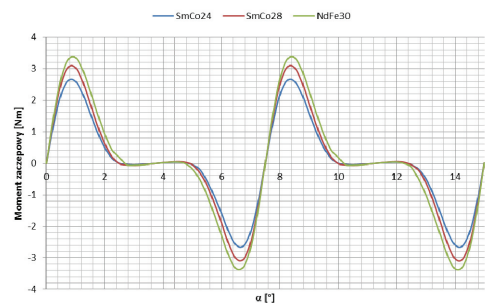
Moment zaczepowy (cogging torque) powstaje w wyniku współdziałania pola magnetycznego powstającego przez działanie magnesów trwałych umieszczonych na wirniku ze stojanem. Charakterystyka ta jest wyznaczana w stanie bezprądowym. Obliczenia momentu zaczepowego dokonano dla 3 różnych rodzajów

magnesów. Charakterystyka momentu zaczepowego obliczonego w RMxprt została przedstawiona na rys. 4



Rys. 4. Charakterystyka momentu zaczepowego w RMxprt  
Fig. 4. Characteristic of the cogging torque in RMxprt

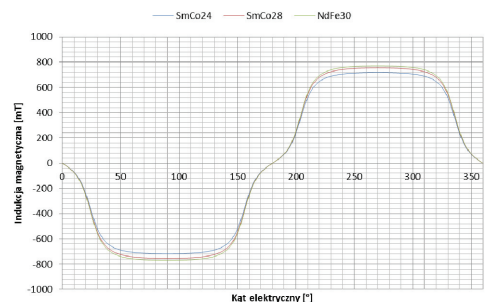
Moment zaczepowy dla modelu 2D wyznaczono dla kroku 0,25 stopnia obrotu wirnika w przedziale (0 ÷ 15°). W celu skrócenia długości obliczeń moment dla modelu 3D wyznaczono w przedziale (0 ÷ 7,5°). Okres zmian momentu zaczepowego obliczanego dla modeli MES wynosi 7,5 stopnia. Wartość ta jest określona jako iloraz 360 przez liczbę 48 zębów. W celu sprawdzenia powtarzalności zmian momentu obliczenia wykonano dla dwóch okresów dla modelu 2D na rys. 5.



Rys. 5. Charakterystyka momentu zaczepowego obliczonego dla modelu 2D  
Fig. 5. Characteristic of the cogging torque calculated for the 2D model

### 6.2. Indukcja magnetyczna w szczelinie powietrznej

Kolejnym etapem analizy było wyznaczenie rozkładu indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej na takich samych modelach jakie zastosowano do obliczenia momentu zaczepowego. Rozkład indukcji magnetycznej obliczony w RMxprt przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie obliczony w RMxprt  
Fig. 6. Distribution of magnetic induction in the gap calculated in RMxprt

Rozkład składowej promieniowej indukcji magnetycznej dla modeli 2D i 3D przedstawiono na rys.7a i 7b.

W celu określenia zmienności składowej promieniowej indukcji magnetycznej dla modeli 2D oraz 3D należy narysować łuk

w środku szczeliny powietrznej i wykorzystując wzory zawarte poniżej wprowadzić je do kalkulatora Maxwell

$$B = B_x \cos(\alpha) + B_y \sin(\alpha) \quad (2)$$

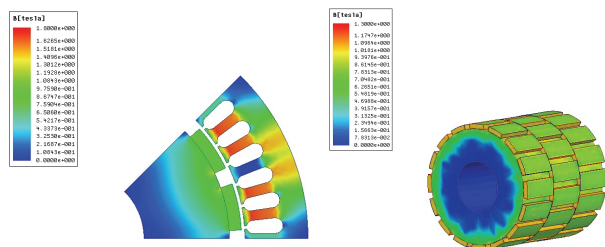
$$Brad_{avg} = \frac{\int |B| dl}{(1.0)dl} * 100\% \quad (3)$$

gdzie:  $dl$  – przyrost długości łuku.

Dokładny opis metody za pomocą której został wyznaczony rozkład składowej promieniowej indukcji magnetycznej przedstawiono w pracy [6].

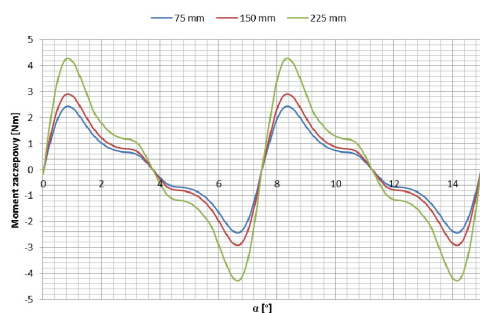
## 7. Analiza porównawcza modeli obliczeniowych prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi N38SH

W celu analizy porównawczej przy pomocy opisanych powyżej 3 metod zamodelowano rzeczywisty model prądnicy na którym wykonano pomiary i w dalszej kolejności zestawiono wyniki obliczeń z wartościami uzyskanymi z pomiarów.

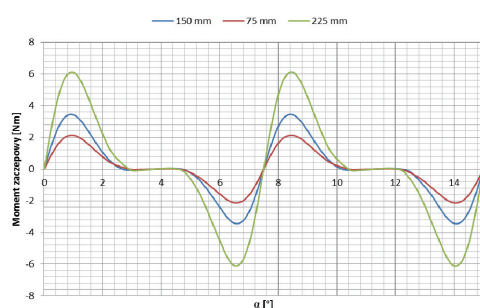


Rys. 7. a) Rozkład indukcji magnetycznej dla modelu 2D dla wybranego położenia wirnika – moment zaczepowy różny od zera; b) Rozkład indukcji magnetycznej dla modelu 3D-III (wirnik wraz z biegunami) dla wybranego położenia wirnika

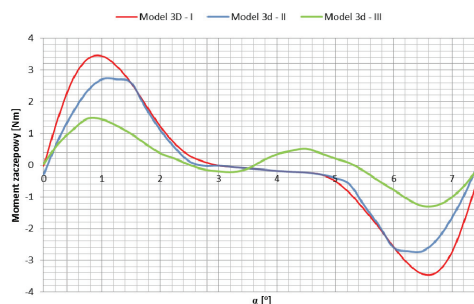
Fig. 7. a) Distribution of magnetic induction for the 2D model for selected rotor position – the cogging torque different from zero; b) Distribution of magnetic induction for the 3D-III model (rotor along with poles) for chosen rotor position



Rys. 8a. Charakterystyka momentu zaczepowego obliczonego dla modelu RMxpirt  
Fig. 8a. Characteristic of the cogging torque for the RMxpirt model



Rys. 8b. Charakterystyka momentu zaczepowego obliczonego dla modelu 2D  
Fig. 8b. Characteristic of the cogging torque calculated for the 2D model



Rys. 9. Charakterystyka momentu zaczepowego obliczonego dla modeli 3D-I, 3D-II, 3D-III

Fig. 9. Characteristic of the cogging torque calculated for the 3D-I, 3D-II, 3D-III model

Na rys. 8a, 8b, przedstawiono moment zaczepowy obliczony w modelach RMxpirt oraz 2D. Momenty te zostały obliczone dla 3 różnych długości pakietu: 75mm, 150 mm oraz 225mm. Natomiast na rys. 9 został przedstawiony wykres momentu zaczepowego dla 3 różnych modeli 3D (3D- I , 3D-II, 3D-III).

## 8. Wnioski

Z badań przeprowadzonych na modelach wynika, że największą dokładność obliczeń otrzymano w module RMxpirt. Wynika to z faktu że obliczenia dokonane w RMxpirt oparte są na wzorach analitycznych dających bardziej zbliżone rezultaty do wyników otrzymanych z pomiarów. Metoda MES 2D jest najmniej poprawna, ponieważ metoda MES 3D daje mniejszy błąd niż metoda 2D. Zauważalne jest również że moment zaczepowy jest mniejszy w przypadku zamodelowania 3 magnesów po długości, natomiast w przypadku zastosowania 3 magnesów po długości ułożonych po skosie moment ten znacznie spada.

W celu otrzymania dokładniejszych wyników w metodzie MES 3D należało by zagęścić siatkę, ale wiąże się to z długim czasem trwania obliczeń. Z przeprowadzonych analiz wynika, że przy projektowaniu prądnicy synchronicznej oprócz wartości geometrycznych takich jak np: długość generatora bardzo ważną rolę odgrywa również wartości magnetyczne magnesów trwałych. Im większe wartości magnetyczne magnesów oraz długości pakietów generatora tym większa jest wartość momentu zaczepowego.

## 9. Literatura

- [1] Spooner E., Williamson A. C.: Direct coupled permanent magnet generators for wind turbine applications, IEE Proceedings Electric Power Application, Vol. 143, No. 1, 1996, pp. 1–8.
- [2] Goryca Z., Młodzikowski P.: Analiza konstrukcji bez przekładniowych prądnic do małych elektrowni wiatrowych, Konferencja Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki PPEEm, Wisła 14-17 grudnia, 2009.
- [3] Goryca Z., Ziółek M., Malinowski M.: Moment zaczepowy wielobiegunowej maszyny z magnesami trwałymi, Zeszyty Problemowe – Maszyny elektryczne Nr 88/2010.
- [4] Król M., Rossa R.: Prądnice Synchroniczne z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika, Zeszyty Problemowe – Maszyny elektryczne Nr 80/2008.
- [5] Lubośny Z.: Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym, WNT, 2006.
- [6] Ansoft Maxwell field simulator v12 training manual Permanent Magnet Synchronous Machine.

otrzymano / received: 22.08.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2012

artykuł recenzowany / revised paper