

Wpływ ekscentryczności wirnika oraz rozmieszczenia magnesów trwałych na wirniku na moment zaczepowy oraz elektromagnetyczny generatora wielobiegunowego wolnoobrotowego

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy generatora wolnoobrotowego wielobiegunowego dla dwóch rodzajów ekscentryczności wirnika jak również dla niesymetrycznego rozmieszczenia magnesów trwałych na wirniku. W tym celu wykonano obliczenia momentu zaczepowego jak również obliczenia momentu elektromagnetycznego dla wymuszenia napięciowego przy obciążeniu generatora rezystancją zastępczą oraz indukcyjnością. Analizę wykonano w środowisku obliczeniowym MAXWELL przy użyciu środowiska transient.

Abstract. In this paper analysis results of the Permanent Magnet Synchronous Generator are presented for two different rotor eccentricities as well as for asymmetrical arrangement of the permanent magnets on the rotor. In this order to investigate of the cogging torque and electromagnetic torque analyzed for excitation of the initial voltage under supplementary resistance and inductance. Analysis was performed with a use of Maxwell code and transient solution type. (The rotor eccentricity and the permanent magnets arrangement on the rotor influence on the cogging and electromagnetic torque of the low-speed multi-pole generator).

Słowa kluczowe: moment zaczepowy, ekscentryczność, generator, rozłożenie magnesów, moment elektromagnetyczny.

Keywords: cogging torque, eccentricity, generator, magnets arrangement, electromagnetic torque.

doi:10.12915/pe.2014.02.47

Wstęp

Rozkład pola magnetycznego w generatorze w głównej mierze zależy od prędkości obrotowej wirnika, oraz wzbudających magnesów trwałych umieszczonych na wirniku. Zmiana rozkładu pola na maszynie może być spowodowana przez ekscentryczność wirnika jak również poprzez niesymetryczne rozłożenie magnesów trwałych na wirniku. Powstanie ekscentryczności może doprowadzić do uszkodzenia maszyny, dlatego powinna być ona wykrywalna oraz kontrolowalna ponieważ ma tendencję do pogłębiania się [1]. Należy również zauważyć, że ekscentryczność jak również nierównomierne rozmieszczenie magnesów trwałych na wirniku może powstać już w czasie produkcji maszyny lub w procesie montażu.

Wystąpienie obydwu zjawisk nie wyklucza pracy maszyny z dalszej pracy, jednakże może wpływać na przebieg momentu zaczepowego jak również momentu elektromagnetycznego i sprawność maszyny. Duży moment zaczepowy wynikający z niesymetrycznego rozłożenia magnesów na wirniku połączony z ekscentrycznością wywołuje duże drgania jak również powoduje zwiększenie hałasu.

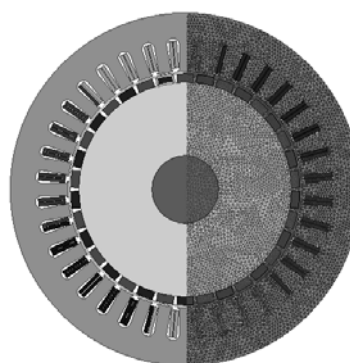
W pracy przeprowadzono obliczenia momentu zaczepowego oraz momentu elektromagnetycznego generatora 2kW pracującego pod obciążeniem w zależności od występowania ekscentryczności wirnika jak również niesymetrycznego rozłożenia magnesów trwałych na wirniku. Analizę tą przeprowadzono w systemie obliczeniowym Ansys-MAXWELL z wykorzystaniem modelu polowo- obwodowego 2D.

Model polowo-obwodowy analizowanego generatora

Model polowo - obwodowy analizowanego generatora wraz z jego siatką dyskretyzacyjną został przedstawiony na rysunku 1. Wirnik został zamodelowany jako stalowa rura, na której osadzone zostały magnesy trwałe N38SH o indukcji remanencji $B_r = 1,15$ T i natężeniu koercji magnetycznej $H_{cb} = 850$ kA/m.

Charakterystyka kątowna momentu zaczepowego została wyznaczana w stanie bezprądowym, natomiast charakterystyka momentu elektromagnetycznego generatora została wyznaczona poprzez zastosowanie wymuszenia napięciowego, przy obciążeniu generatora rezystancją zastępczą (1) oraz indukcyjnością.

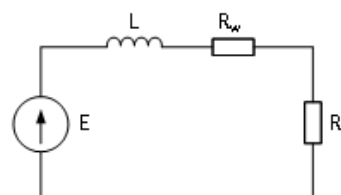
$$(1) \quad R = R_o + R_w$$



Rys.1. Model polowo-obwodowy analizowanego generatora

Do obliczeń przyjęto prędkość synchroniczną generatora o wartości 176,5 obr/min.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat zastępczy, który został zastosowany do obliczeń. Schemat ten dotyczy każdej z faz uzwojenia generatora.



Rys.2. Schemat zastępczy każdej z faz generatora dla obciążenia rezystancyjnego

Wpływ ekscentryczności na moment zaczepowy oraz elektromagnetyczny generatora

Mimośrodowość, czyli ekscentryczność maszyn powoduje nierównomierny rozkład szczeliny powietrznej istniejącej pomiędzy stojanem a wirnikiem [2-3].

Rozróżnia się trzy rodzaje ekscentryczności [4]:

1. statyczną,
2. dynamiczną,
3. mieszaną.

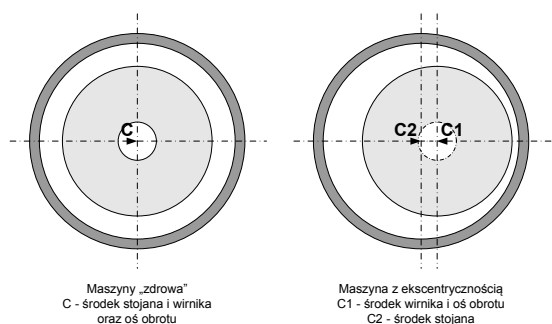
W przypadku ekscentryczności statycznej, położenie minimalnej szczeliny powietrznej jest stałe w przestrzeni. Niewspółosiowość statyczna może zostać wywołana przez owalność rdzenia stojana lub przez niepoprawne

pozycjonowanie (ustawienie) wirnika lub stojana na etapie produkcji lub montażu.

W przypadku ekscentryczności dynamicznej środek wirnika nie jest środkiem wirowania (obrotu) i położenie minimalnej szczeliny powietrznej przemieszcza się po obwodzie stojana. Ta mimośrodowość może być spowodowana kilkoma czynnikami takimi jak: zgięty wał wirnika, zużyte łożyska, niewspółosiowość lub mechaniczny rezonans występujący podczas pracy przy krytycznej prędkości.

W nowych silnikach dopuszczalna jest nierównomierność szczeliny powietrznej do 10% [3]. Jednakże producenci silników zwykle starają się zapewnić jeszcze niższy poziom ekscentryczności, w celu ograniczenia drgań i hałasu oraz zmniejszenia niesymetrycznej siły promieniowej.

Najczęściej w silnikach występuje jednocześnie mimośrodowość statyczna jak i dynamiczna, czyli tzw. ekscentryczność mieszana. W tym przypadku oś wirowania znajduje się gdzieś pomiędzy punktami C1 i C2 jak pokazano na rysunku 3 [2].



Rys.3. Współosiowe i mimośrodowe usytuowanie wirnika w otworze [2]

Poziom ekscentryczności można wyrazić w procentach w sposób następujący (2)

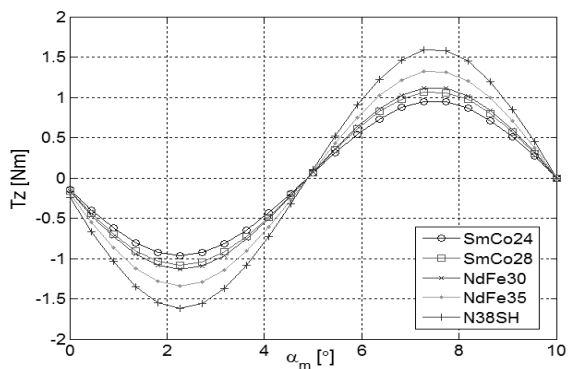
$$(2) \quad e = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \cdot 100\%$$

gdzie: δ_1 – aktualna grubość minimalnej szczeliny powietrznej, δ_2 – aktualna grubość maksymalnej szczeliny powietrznej.

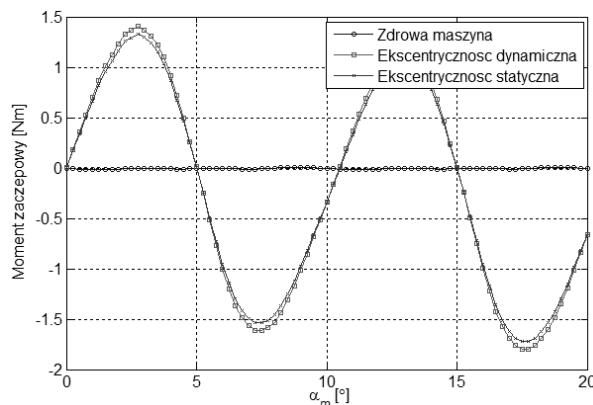
Analizę ekscentryczności przeprowadzono dla dwóch rodzajów ekscentryczności. W tabeli 1 zaprezentowano rodzaj ekscentryczności oraz jej poziom.

Tabela 1. Zestawienie dwóch rodzajów ekscentryczności

Rodzaj ekscentryczności	Poziom ekscentryczności
Dynamiczna	43,33 %
Statyczna	43,33 %



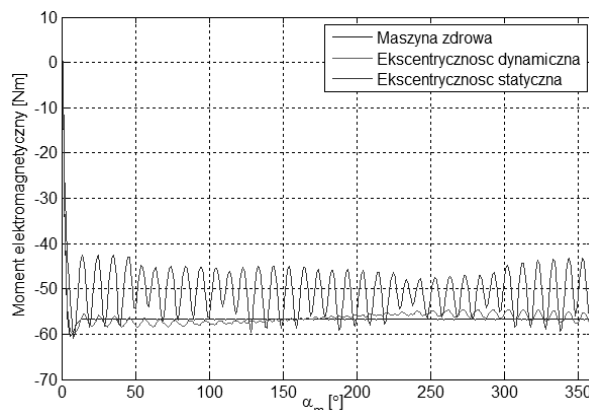
Rys.4. Charakterystyka momentu zaczepowego dla generatora SPMSM 2kW w funkcji kąta obrotu wirnika dla różnych rodzajów magnesów



Rys.5. Charakterystyki kątowe momentu zaczepowego dla dwóch rodzajów ekscentryczności i zdrowej maszyny

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystyki momentu zaczepowego dla generatora SPMSM 2kW w funkcji kąta obrotu wirnika dla różnych rodzajów magnesów, natomiast na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki kątowe momentu zaczepowego dla dwóch rodzajów ekscentryczności oraz dla zdrowej maszyny.

Na rysunku 6 przedstawiono charakterystyki kątowe momentu elektromagnetycznego dla dwóch rodzajów ekscentryczności przy wymuszeniu napięciowym dla indukcyjności wynoszącej $L_{ii} = 0,0138$ H oraz $R = 50$ Ω .

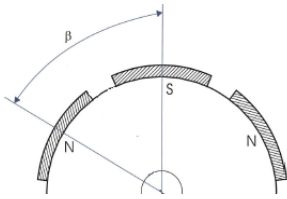


Rys.6. Charakterystyki kątowe momentu elektromagnetycznego dla dwóch rodzajów ekscentryczności oraz dla zdrowej maszyny przy $L_{ii} = 0,0138$ H i $R = 13$ Ω

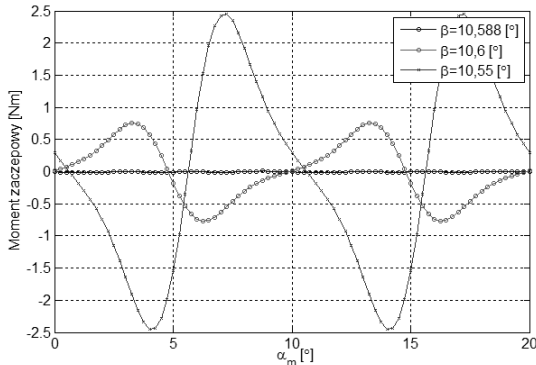
Wpływ niesymetrycznego ułożenia magnesów na wirniku na moment zaczepowy oraz elektromagnetyczny generatora

W pracach [5, 6] pokazano rozwiązania konstrukcyjne dotyczące niesymetrycznego rozmieszczenia magnesów na obwodzie wirnika. Na rysunku 7 przedstawiono wirnik wraz z magnesami oraz oznaczonym kątem (β) określającym kąt zawarty pomiędzy magnesami [7]. Analiza niesymetrycznego rozmieszczenia magnesów na obwodzie wirnika została wykonana dla dwóch przypadków gdzie kąt (β) wynosił odpowiednio $10,6^\circ$ i $10,55^\circ$. Dla zdrowej maszyny kąt (β) rozmieszczenia magnesów trwałych na wirniku wynosi odpowiednio $360/34 = 10,588^\circ$.

Na rysunku 8 przedstawiono charakterystyki kątowe momentu zaczepowego dla dwóch rodzajów przypadków niesymetrycznego rozmieszczenia magnesów na wirniku wraz z charakterystyką dla zdrowej maszyny.

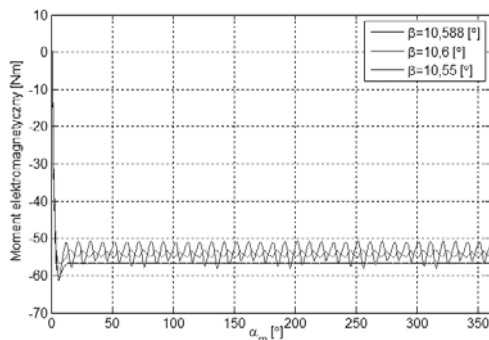


Rys.7. Wirnik z magnesami oraz kątem β określającym rozmieszczenie magnesów na wirniku

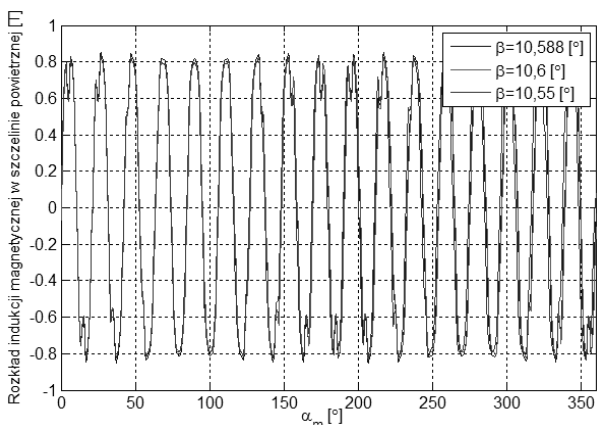


Rys.8. Charakterystyki kątowe momentu zaczepowego dla dwóch rodzajów niesymetrycznego rozłożenia magnesów na wirniku oraz dla zdrowej maszyny

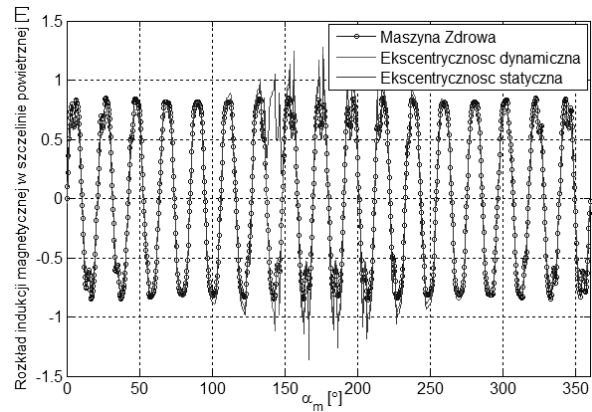
Na rysunku 9 przedstawiono charakterystyki kątowe momentu elektromagnetycznego dla dwóch rodzajów niesymetrycznego rozmieszczenia magnesów na wirniku wraz z charakterystyką dla zdrowej maszyny przy wymuszeniu napięciowym dla indukcyjności wynoszącej $L_{ii} = 0,0138$ H oraz $R = 13 \Omega$.



Rys.9. Charakterystyki kątowe momentu elektromagnetycznego dla dwóch rodzajów niesymetrycznego rozłożenia magnesów na wirniku przy $L_{ii} = 0,0138$ H i $R = 13 \Omega$



Rys.10. Rozkład składowej promieniowej indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej dla zdrowej maszyny oraz dla przypadków z występującą ekscentrycznością statyczną oraz dynamiczną

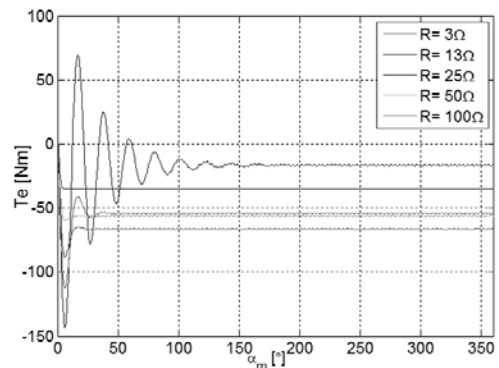


Rys.11. Rozkład składowej promieniowej indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny dla dwóch rodzajów niesymetrycznego rozłożenia magnesów na wirniku oraz dla zdrowej maszyny

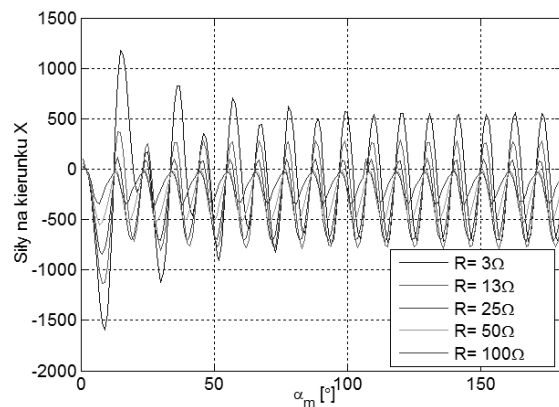
Kolejnym etapem analizy było wyznaczenie rozkładu indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej. W celu określenia zmienności składowej promieniowej indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej posłużyliśmy się zależnością (3)

$$(3) \quad B = B_x \cos(\alpha) + B_y \sin(\alpha)$$

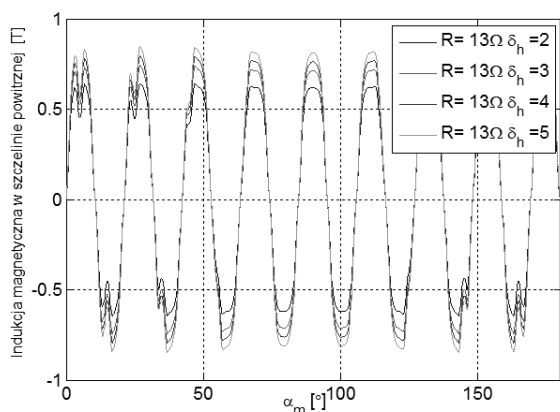
Rozkład składowej promieniowej indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej dla przeanalizowanych przypadków przedstawiono na rysunkach 10-11.



Rys.12. Charakterystyka momentu elektromagnetycznego generatora SPMSM 2kW w funkcji kąta obrotu wirnika dla różnych obciążeń (R) maszyny



Rys.13. Charakterystyka sił na kierunku X generatora SPMSM w funkcji kąta obrotu wirnika dla różnych obciążeń (R) maszyny



Rys.14. Charakterystyka indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej generatora w funkcji kąta obrotu wirnika dla różnych grubości magnesów przy obciążeniu $R = 13 \Omega$

Wnioski

Na podstawie badań numerycznych można przyjąć hipotezę, że ekscentryczność wirnika i niesymetryczne rozmieszczenie magnesów mają istotny wpływ na charakterystyki kątowe momentu zaczepowego oraz elektromagnetycznego. W przypadku tworzenia fizycznego modelu oraz przy jego montażu należy zapewnić właściwą dokładność wykonania, ponieważ z wykonanych analiz wynika że z powodu niesymetrycznego rozłożenia magnesów trwałych na wirniku jak również z powodu występowania ekscentryczności może dochodzić do podwyższenia momentu zaczepowego. W przypadku niesymetrycznego rozłożenia magnesów na wirniku zdrowy model osiąga wartość momentu zaczepowego wynoszący około 30 mNm, natomiast w przypadku niesymetrycznego rozłożenia magnesów moment potrafi wzrosnąć nawet do 2,5 Nm. W przypadku ekscentryczności widać również znaczny wzrost wartości momentu zaczepowego. Natomiast jeśli chodzi o moment elektromagnetyczny w przypadku niesymetrycznego rozłożenia magnesów na wirniku, jak również w przypadku ekscentryczności występują jego duże oscylacje. Na podstawie obliczeń polowo obwodowych wykonywanych na modelach 2D można stwierdzić, że

wartość momentu zaczepowego jest uzależniona od odpowiedniego zagęszczenia siatki w szczeliny jak również w obrębie magnesów i na nich samych. Dobranie odpowiedniej gęstości siatki obliczeniowej jest bardzo ważne szczególnie w przypadku gdy na wirniku znajduje się duża ilość magnesów trwałych, ponieważ źle dobrana siatka obliczeniowa może doprowadzać do słabego namagnesowania się magnesów a w dalszej kolejności może wpływać na błędne wyniki.

LITERATURA

- [1] Ewert P., Zawilak T., Zastosowanie modelu polowo-obwodowego do monitorowania ekscentryczności silników indukcyjnych, *Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne*, nr 87 (2010)
- [2] Kowalski Cz. T., Ewert P., Zastosowanie analizy widmowej prądu stojana do monitorowania ekscentryczności silników indukcyjnych, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, Nr 60, seria Studia i Materiały, nr 27 (2007)
- [3] Nandi S., Toliyat H. A., Li X., Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 4, December 2005, 719-729
- [4] Drozdowski P., Petryna J., Weinreb K., Interakcja efektów elektrycznych, magnetycznych oraz mechanicznych w silnikach indukcyjnych w aspekcie diagnostyki, *Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne*, nr 54 (1997), BOBRME Komel, 109-116
- [5] Łukaniszyn M., Młot A., Analiza momentu elektromagnetycznego i składowych pulsujących w bezszczotkowym silniku prądu stałego wzbudzonym magnesami trwałymi, *XLI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME 2005, Jarnołtówek, 2005*, 157-162
- [6] Młot A., Wpływ rodzaju magnesów trwałych na wybrane parametry elektromechaniczne bezszczotkowego silnika prądu stałego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Seria Informatyka*, Opole, 2005, nr 302 (2005), 119-128
- [7] Młot A., Konstrukcyjne metody ograniczenia pulsacji momentu elektromagnetycznego w bezszczotkowym silniku prądu stałego z magnesami trwałymi, *Autoreferat rozprawy Doktorskiej, Politechnika Opolska, Opole, 2007*

Autorzy: dr inż. Damian Mazur, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, B206, 35-959 Rzeszów, e-mail: mazur@prz.edu.pl