

*generator turbiny wiatrowej, maszyna ze strumieniem osiowym,  
generator tarczowy, bezzłobkowy stojan, napięcie rotacji*

Adrian MŁOT\*, Mariusz KORKOSZ\*\*

## **ANALIZA WYBRANYCH PARAMETRÓW CAŁKOWYCH BEZZŁOBKOWEGO 3-FAZOWEGO GENERATORA TARCZOWEGO Z PODWÓJNYM WIRNIKIEM**

W artykule przedstawiono analizę wybranych parametrów całkowych generatora z podwójnym wirnikiem o strumieniu osiowym przeznaczonego do zastosowania w małej elektrowni wiatrowej. Celem pracy było osiągnięcie wymaganej wartości napięcia rotacji wystarczającej do ładowania baterii akumulatorów. W celu zrealizowania tego problemu zbudowano trójfazowy model połowy oparty na metodzie elementów skończonych (MES). Na bazie modelu połowo-obwodowego wyznaczono przebiegi czasowe, charakterystyki wyjściowe generatora oraz jego sprawność.

### 1. WSTĘP

W niniejszym artykule przedstawiono analizę generatora tarczowego z niskoenergetycznymi magnesami z podwójnym wirnikiem pracującego jako generator małej mocy. W maszynach takich wytworzenie momentu elektromagnetycznego, napięcia rotacji i nasycenia obwodu magnetycznego nie tylko będzie zależało od użycia odpowiednich magnesów, ale także od wymiarów średnicy zewnętrznej i wewnętrznej rdzeni stojana i wirnika. Tym samym można uzyskać minimalną masę generatora tarczowego oraz ograniczyć wymiar maszyny w kierunku osiowym [7, 4]. Masa generatora elektrycznego oraz jego rozmiary są jednym z ważniejszych kryteriów branych pod uwagę podczas projektowania maszyny elektrycznej. W tym celu należy uwzględnić szereg kryteriów tj. gabaryty a także masę generatora [8, 10].

Maszyny ze strumieniem osiowym równie często są stosowane jako generatory wykorzystywane do budowy przydomowych elektrowni wiatrowych przy niedużych gospodarstwach [1, 2, 3]. W niniejszym artykule przedstawiono model połowy trójfa-

---

\* Politechnika Opolska, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole, a.mlot@po.opole.pl

\*\* Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, mkosz@prz.edu.pl

zowego bezzłobkowego generatora małej mocy o liczbie biegunów stojana równej 24 i o 4 parach biegunów wirnika. Bezzłobkowy rdzeń pozwolił wyeliminować problem nadmiernego nasycania się obwodu magnetycznego i tym samym zmniejszenie ryzyka generowania nadmiernych strat w żelazie. Generator ten również jest pozbawiony przekładni, co wpływa na prostą budowę i zmniejszenie gabarytów maszyny. Zbudowany model połowy posłużył do wykonania obliczeń istotnych parametrów całkowych tj. moment zaczepowy, napięcie rotacji indukowane w uzwojeniu, moc wyjściową generatora a także sprawność. W związku z przeznaczeniem badanego modelu tzn. jako generator turbiny wiatrowej żąda się by napięcie indukowane w uzwojeniu było na tyle wysokie, aby zapewnić ładowanie akumulatorów. W pracy pokazano wyniki obliczeń numerycznych na wybranym modelu połowym z pośród przeprowadzonych modyfikacji obwodu magnetycznego. W celu przeprowadzenia obliczeń połowych użyto program trójwymiarowy (3D) bazujący na metodzie elementów skończonych [6].

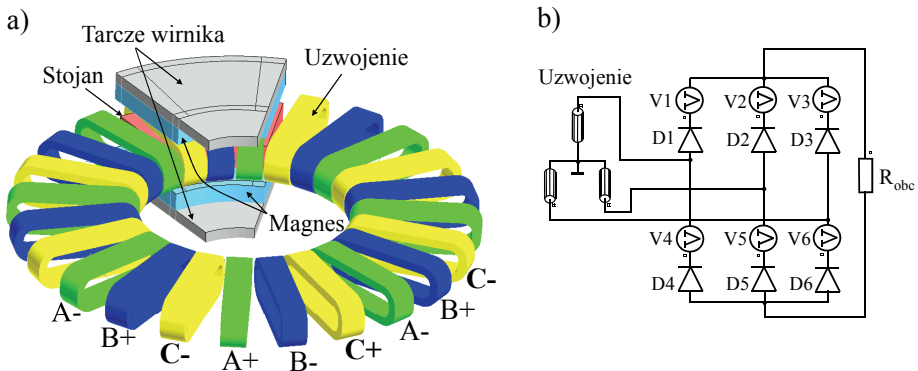
## 2. OPIS KONSTRUKCJI BADANEGO GENERATORA

Głównym założeniem w badaniach było zaprojektowanie w taki sposób obwodu magnetoelektrycznego generatora aby mógł on pracować z akumulatorami o napięciu 14 V. Z możliwością do zwiększenia ich ilości do kilku (połączenie szeregowe). Dlatego też maksymalne żądane napięcie indukowane w uzwojeniu stojana nie powinno przekraczać np. 84 V.

W maszynach tarczowych w celu optymalnego wykorzystania objętości, stosunek średnicy wewnętrznej do zewnętrznej rdzenia powinien mieścić się w przedziale 0,5–0,6. W analizowanym modelu połowym współczynnik ten wynosi 0,59 [4, 7]. Prędkość do jakiej będzie mógł być rozpedzony generator będzie uzależniona od prędkości wiatru.

Stojan o grubości 7 mm został wykonany z rdzenia ze stali krzemowej (ang. *silicon-iron steel*) jako zwinięty z taśmy dysk. Na obwodzie stojana umieszczono 24 cewki o liczbie zwojów równej  $N = 62$ . Na każde pasmo przypada 8 cewek połączonych szeregowo. Oszacowana rezystancja każdego pasma wynosi 2,96  $\Omega$ . Tarcze wirnika wykonane są z litej stali o grubości 3 mm. Na ich wewnętrznych powierzchniach zamocowane są niskoenergetyczne magnesy pokrywające podziałkę biegunową, które wytwarzają strumień w kierunku osiowym. Z uwagi na użycie magnesów o nie dużej wartości indukcji pozostałości magnetycznej ( $B_r = 0,66$  T) ograniczony został efekt nadmiernego nasycania się rdzeni stojana i wirnika pomimo znacznej grubości magnesów (5mm). Stosunek promienia wewnętrznego do zewnętrznego dla stojana wynosi 34 mm/58 mm oraz wirnika 17,2 mm/69,2 mm. Szczelina powietrzna pomiędzy rdzeniem stojana a wirnikiem, tj. od powierzchni cewki do powierzchni magnesu wynosi 1,5 mm. W celu zapewnienia odpowiedniej wartości przepływu strumienia magne-

tycznego w obwodzie magnetycznym generatora, zarówno magnesy oraz cewki umieszczono centralnie do rdzenia stojana. Ze względu na symetryczną geometryczną strukturę analizę pola magnetycznego wykonano dla modeli z ograniczonym obszarem obliczeniowym do jednej podziałki biegunowej (rys. 1a). Aby uzyskać wyprostowane napięcie indukowane w uzwojeniach, model połowy połączono z modelem obwodowym, w którym został zamodelowany układ prostowniczy z obciążeniem rezystancyjnym ( $R_{\text{obc}}$ ). Zastosowany obwód elektryczny pokazano na rysunku 1b, który w sposób uproszczony odzwierciedla rzeczywisty układ prostownikowy typu GBPC104 822C o napięciu przewodzenia diody równym 1V.



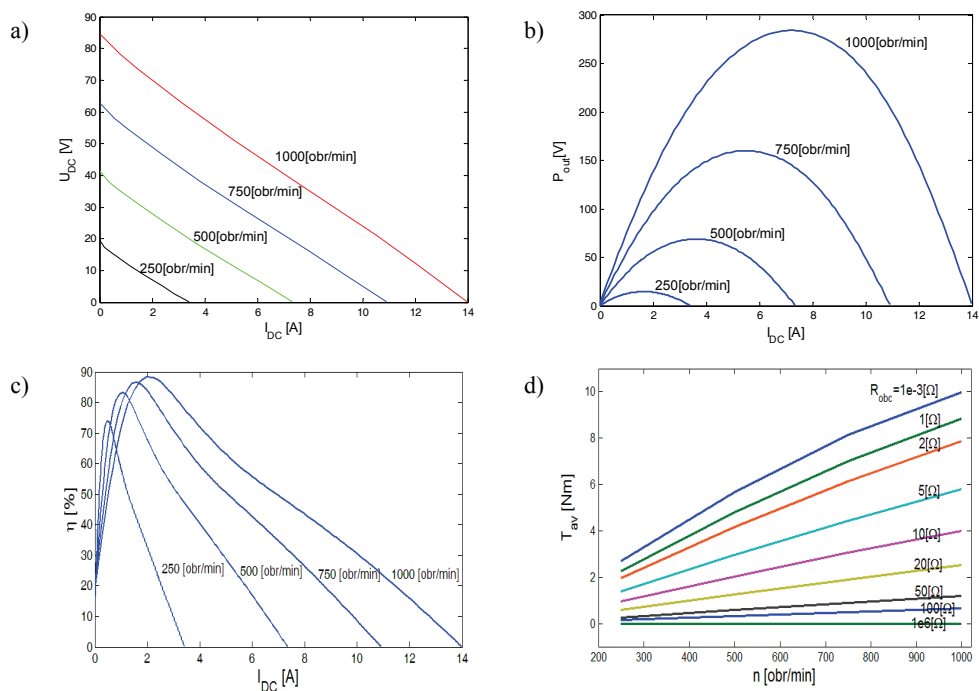
Rys. 1. Model 3D badanego generatora (a) oraz zastosowany obwód elektryczny (b)  
Fig. 1. Model 3D of axial flux generator (a) and electric circuit (b)

Wszystkie cewki tworzące jedno pasmo zostały połączone szeregowo zgodnie. Dzięki temu uzyskano większą wartość napięcia na wyjściu prostownika.

### 3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki elektromechaniczne badanego generatora tarczowego wyznaczone na podstawie badań symulacyjnych. Obliczenia wykonano dla kilku prędkości obrotowych zmieniając wartość obciążenia rezystancyjnego od wartości 1 m $\Omega$  (stan zwarcia) do wartości 1 M $\Omega$  (stan jałowy) z określonym krokiem. Napięcie indukowane w uzwojeniach na obciążeniu pokazano na rysunku 2a. Moment zaczepowy powstały w wyniku współdziałania pola wytworzonego przez magnesy ze stalowym rdzeniem stojana przy maksymalnej prędkości do jakiej rozpuściono wirnik w stanie jałowym nie przekraczał 0,016Nm. Zmienność średniej wartości momentu  $T_{\text{av}}$  wytworzonego przez generator w funkcji prędkości  $n$  przy różnym obciążeniu rezystancyjnym pokazano na rysunku 2d. Zależność mocy wyjściowej

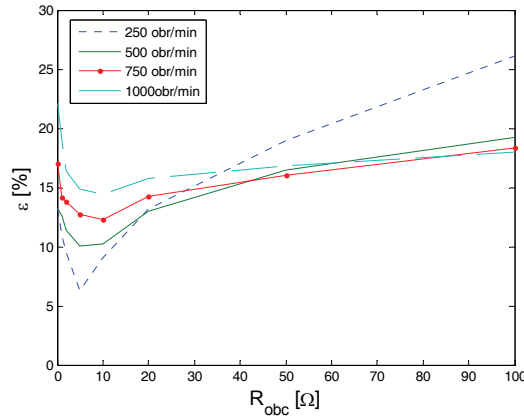
generatora ( $P_{out} = U_{DC} \cdot I_{DC}$ ) od prądu obciążenia  $I_{DC}$  dla kilku zadanych prędkości obrotowych przedstawiono na rysunku 2b. Na podstawie wyznaczonej wartości momentu  $T_{av}$  można obliczyć wyznaczyć moc wejściową  $P_{in}$  równą  $P_{in} = T \cdot \omega$ , gdzie  $\omega$  jest prędkością kątową. Dla obliczonej mocy wejściowej i wyjściowej oraz przy założonych stratach mechanicznych zależnych od prędkości obrotowej obliczono sprawność wypadkową układu generatora (rys. 2c). Sprawność maksymalna generatora przy 1000 obr/min wynosiła 88,3% i spada do 74% dla niskich prędkości. W obliczeniach uwzględniono straty w układzie prostownikowym oraz straty w miedzi natomiast pominięto straty w rdzeniu generatora.



Rys. 2. Zależność napięcia na obciążeniu (a), mocy wyjściowej (b), sprawności generatora (c) w funkcji prądu obciążenia indukowanego w uzwojeniu, dla różnych prędkości oraz momentu elektromagnetycznego w funkcji prędkości dla różnych rezystancji obciążenia (d)  
 Fig. 2. Rectified voltage (a), output power (b), efficiency of generator (c) vs. rectifier current induced in the winding for different speed and average torque vs. speed for various resistance load (d)

Zmienność napięcia wyjściowego na wyjściu mostka prostownikowego podczas zmian obciążenia ( $R_{obc}$ ) mieści się w granicach od 14 V do 70 V przy maksymalnej sprawności generatora. Mając do dyspozycji akumulator o napięciu 14 V, napięcie jakie udało się uzyskać jest wystarczające do połączenia w szereg do 4–5 akumulatorów. Zasadniczą wadą badanej maszyny elektrycznej są tętnienia momentu wytwa-

rzanego w szczelinie powietrznej pomimo braku uzłobkowania stojana. Dla prędkości 1000 obr/min współczynnik tętnień wynosi 26%, dla prędkości poniżej 750 obr/min pulsacje nie przekraczają 19% (rys. 3). Współczynnik ten przyjęto jako stosunek różnicy momentu maksymalnego i minimalnego do wartości średniej momentu.



Rys. 3. Zmienność tętnień momentu w funkcji obciążenia rezystancyjnego dla różnych prędkości  
Fig. 3. Ripple torque vs. resistance load for different speeds

Przyszłym etapem badań będzie porównanie modeli polowych generatorów o różnej liczbie biegunów stojana a także porównanie modeli trójfazowych z jednofazowymi celem poprawy wybranych własności magnetoelektrycznych.

#### 4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono model polowy trójfazowego generatora tarczowego małej mocy z magnesami i podwójnym wirnikiem. Na podstawie trójwymiarowego modelu zbudowanego przy zastosowaniu metody elementów skończonych dokonano analizy pola magnetycznego i wybranych parametrów całkowitych. Celem przeprowadzonych badań było uzyskanie odpowiedzi jak dużą wartość napięcia rotacji jest w stanie wyindukować w uzwojeniach analizowany model generatora tarczowego (uzyskano 84 V) oraz określenie podstawowych parametrów funkcjonalnych generatora takich jak moment elektromagnetyczny, moc i sprawność. Do ważniejszych zalet omówionej maszyny tarczowej należy zaliczyć wysoką sprawność wypadkową ( $\eta = 88,3\%$ ), małe gabaryty, prostą konstrukcję generatora oraz krótkie połączenia czołowe, co pozwala obniżyć zużycie miedzi i zmniejszyć straty mocy w uzwojeniach.

*Badania przeprowadzono z zastosowaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 „Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007–2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.*

#### LITERATURA

- [1] ANI S.O., POLINDER H., FERREIRA J.A., *Energy yield of two generator system for small wind turbine application*, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC, May 2011, pp. 735–740.
- [2] ANDRIOLLO M., BERTOLI M., MARTINELLI G., MORINI A., TORELLA A., *Permanent magnet axial flux disc generator for small wind turbines*, Electrical Machines, ICEM, IEEE, September 2008, pp. 1–6.
- [3] BUMBY J.R., STANNARD N., DOMINY J., McLEOD N., *A permanent magnet generator for small scale wind and water turbines*, Electrical Machines, IEEE, September 2008, pp. 1–6.
- [4] CIERZEWSKI P., *Bezrdzeniowy silnik tarczowy z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 77, 2007, s. 161–166.
- [5] GERLANDO A., FOGLIA G., IACCHETTI M., PERINI R., *Axial flux PM machines with concentrated armature windings: Design analysis and test validation of wind energy generators*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 9, September 2011, pp. 3795–3805.
- [6] Flux 10.3 Documentation, 2009, Cedrat Group.
- [7] GLINKA T., WOLNIK T., KRÓL E., *Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym – obliczenia obwodu elektromagnetycznego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 92, 2011, s. 23–28.
- [8] JAVADI S., MIRSALIM M., *Design and analysis of 42-V coreless axial-flux permanent – magnet generators for automotive applications*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 4, April 2010, pp. 1015–1023.
- [9] JAVADI S., MIRSALIM M., *Design and analysis of 42-V coreless axial-flux permanent – magnet generators for automotive applications*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 4, April 2010, pp. 1015–1023.
- [10] MENDRELA E., MOCH J., PADUCH P., *Właściwości elektromechaniczne bezszczotkowego silnika tarczowego prądu stałego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 50, Studia i Materiały, Nr 22, 2000, s. 189–198.
- [11] YICHENG C., PRAGASEN P., *Axial-flux PM wind generator with a soft magnetic composite core*, Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting, IEEE, Vol. 1, October 2005, pp. 231–237.

#### ANALYSIS OF THE INTEGRAL PARAMETERS IN THE SMALL POWER 3-PHASE SLOTLESS AXIAL FLUX GENERATOR WITH DOUBLE ROTOR CORE

Design of axial-flux generators with magnets is a part of on-going energy storage research project for wind energy applications. In this paper axial flux 3-phases small power generator with magnets and double rotor has been analysed. Presented machine consist slotless stator core which is made of lamination. Electromagnetic requirements of the electric machine were achieved by doing three-dimensional finite element analyses. A three-dimensional analysis was necessary by nature of arrangement coils such as end-winding effect. The main goal of electromagnetic field investigation was achieve high enough induced rectifier DC voltage from three phase winding and high efficiency.