

Adrian Młot
Marian Łukaniszyn
Politechnika Opolska

WPLYW ZMIANY LICZBY BIEGUNÓW STOJANA NA WYBRANE PARAMETRY FUNKCJONALNE W BEZZŁOBKOWYM GENERATORZE TARCZOWYM

INFLUENCE OF CHANGING A NUMBER OF STATOR POLES ON THE INTEGRAL PARAMETERS IN THE SLOTLESS AXIAL FLUX GENERATOR

Abstract: Design of axial-flux generators with magnets is a part of an on-going energy storage research project for wind energy applications. In this paper axial flux one-phase small power prototype of a generator with magnets is analysed. The prototype is modified to three-phase models and the number of stator poles are changed as well. The presented machines consist of slotless stator cores which are made of lamination. Electromagnetic requirements for axial-flux electric machines are achieved by doing three-dimensional finite element analyses. A three-dimensional analysis is necessary due to the nature of arrangement coils such as end-winding effect. The main goal of the electromagnetic field investigation is the achieved high induced rectifier DC voltage from the three phase winding and high efficiency.

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę wybranych parametrów funkcjonalnych prototypu jednofazowego generatora o strumieniu osiowym, przeznaczonego do zastosowania w bardzo małej elektrowni wiatrowej. W generatorze zastosowano stosunek liczby biegunów stojana do wirnika równy 8/8. Celem pracy było sprawdzenie parametrów elektromechanicznych generatora i wygenerowanie wystarczającej wartości napięcia w uzwojeniu stojana, zdolnej do naładowania baterii połączonych szeregowo akumulatorów. W tym celu opracowano trójwymiarowy model obliczeniowy oparty na metodzie elementów skończonych (MES) a następnie zweryfikowano pomiarowo wyniki obliczeń. Model obliczeniowy posłużył do wykonania modyfikacji generatora, która polegała na zwiększeniu stosunku liczby biegunów stojana do liczby biegunów wirnika do 9/8, 12/8 i 24/8. We wszystkich zmodyfikowanych wersjach generatora zwiększono liczbę faz do trzech. Dla każdej opracowanej wersji generatora wykonano analizę mocy, sprawności oraz momentu elektromagnetycznego.

Słowa kluczowe: generator turbiny wiatrowej, generator tarczowy, stojan bezźłobkowy

Keywords: wind power generator, axial flux generator, slotless stator

1. Wstęp

W trakcie projektowania maszyn elektrycznych ważne jest poprawne zbudowanie obwodu magnetycznego oraz określenie rozmiarów poszczególnych elementów w zależności od pożądanej wartości momentu i mocy maszyny elektrycznej [1-9]. Właściwe rozmieszczenie uzwojeń oraz wybór odpowiedniego rodzaju obwodu magnetycznego maszyny elektrycznej ze strumieniem osiowym i magnesami trwałymi pozwala na uzyskanie lepszych własności eksploatacyjnych, tj. wyższego stosunku momentu do objętości.

W artykule przedstawiono prototyp jednofazowego generatora małej mocy o stosunku liczby biegunów stojana do wirnika równym 8/8. W prototypie tym zastosowano trapezoidalny kształt cewek i magnesów. Wykonano pomiary momentu elektromagnetycznego, napięcia in-

dukowanego w uzwojeniu (napięcie rotacji) oraz mocy wyjściowej generatora. Pomiary porównano z obliczeniami wykonanymi przy wykorzystaniu modelu trójwymiarowego bazującego na metodzie elementów skończonych [11]. Uzyskana zgodność wyników pomiarów z obliczeniami pozwoliła na przeprowadzenie dalszych badań, tzn. wykonanie modyfikacji prototypu celem uzyskania wyższego napięcia rotacji oraz zwiększenia sprawności.

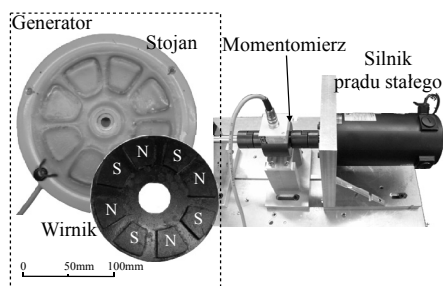
Głównym założeniem przeprowadzonych badań było sprawdzenie, jaki wpływ na parametry funkcjonalne ma zmiana uzwojenia 1-fazowego na trójfazowe o różnej liczbie biegunów, a także, czy uzwojenia fazowe będą generować odpowiednio duże napięcie rotacji, wystarczające do ładowania baterii złożonej z kilku połączonych szeregowo akumulatorów (każdy akumulator o napięciu ładowania 14V). Założono, że akumulatory ładowane będą bezpośrednio

z mostka prostowniczego. Ponadto założono, że napięcie indukowane w uzwojeniu stojana powinno zawierać się w przedziale $70V \div 84V$. Przedstawiony prototyp generatora może być zastosowany do zasilania systemu elektrycznego o niewielkiej mocy, np. oświetlenia [10].

2. Konstrukcje generatorów tarczowych

2.1. Prototyp 1-fazowego generatora

Prezentowany generator tarczowy nie wymaga zaawansowanej technologii i może być zbudowany w warsztacie elektrycznym. Brak przekładni sprawia, że koszty budowy generatora tarczowego są znacznie mniejsze, niż generatorów innych typów. Na rys. 1 pokazano stanowisko pomiarowe i prototyp generatora. Generator został połączony mechanicznie z maszyną prądu stałego. Pomiędzy maszynami umieszczono momentomierz tensometryczny o zakresie pomiarowym $0 \div 5Nm$. Tarcza wirnika wykonana została z litej stali, a na jej wewnętrznej powierzchni zamocowane zostały magnesy ferrytowe w kształcie trapezoidalnym, wytwarzające strumień magnetyczny w kierunku osiowym. Z uwagi na użycie magnesów ferrytowych o niewielkiej wartości indukcji magnetycznej ograniczony został efekt nadmiernego nasycania się rdzenia stojana i wirnika.



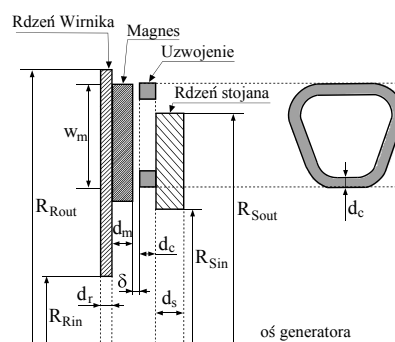
Rys. 1. Prototyp 1-fazowego generatora o strumieniu osiowym oraz stanowisko pomiarowe

W celu ograniczenia prądów wirowych, stojan generatora wykonano ze stali krzemowej (ang. silicon-iron steel) w postaci zwiniętego z taśmy dysku. Na obwodzie stojana umieszczone zostało uzwojenie jednofazowe z cewkami połączonymi szeregowo. Zastosowane uzwojenia skupione zapewniają krótkie połączenia czołowe w kierunku promieniowym a tym samym zmniejszone zostały straty w miedzi, zwiększając w ten sposób sprawność generatora.

W aplikacjach generatorów wiatrowych z pośredniczącym obwodem napięcia stałego ważne jest, aby przebieg momentu elektroma-

gnetycznego charakteryzował się jak najmniejszymi pulsacjami. Mały poziom pulsacji momentu zapewnia lepsze właściwości generatora przy małych prędkościach wiatru, a także redukuje szkodliwe wibracje. Zastosowanie struktury bezżłobkowej rdzenia generatora pozwoliło ograniczyć pulsacje w rozkładzie przestrzennym indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.

Przekrój osiowy modelu generatora pokazano na rysunku 2. Całkowita szczelina powietrzna pomiędzy rdzeniem stojana a wirnikiem, tj. do powierzchni magnesu wynosi $5,5mm$ ($\delta + d_c$). Szczelina ta zapewnia przestrzeń do ulokowania uzwojeń stojana, których wielkość i liczba zwojów zależą od żądanej wartości napięcia indukowanego w uzwojeniu.



Rys. 2. Przekrój osiowy badanego modelu generatora

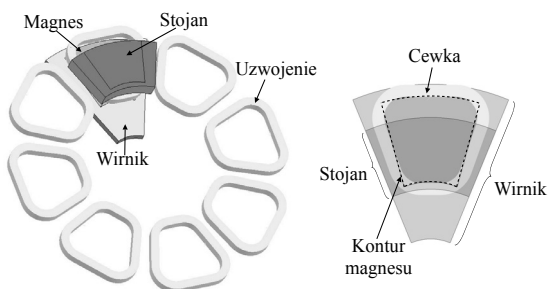
Przy projektowaniu maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi należy dokładnie przeanalizować rozkład i wielkość strat, ze względu na fakt, że mogą one znacząco obniżyć sprawność generatora, a w skrajnych przypadkach rozmagnesować magnesy w wyniku niekontrolowanego wzrostu temperatury wewnątrz generatora. Ze względu na brak użłobkowanego rdzenia stojana i wystarczająco duży dystans pomiędzy rdzeniem wirnika i stojana w prezentowanych obliczeniach połowych nie uwzględniono strat w magnesach oraz w żelazie. Ponadto, z uwagi na niskie częstotliwości pracy generatora, a także zastosowanie magnesów ferrytowych (nisko-energetycznych), prądy wirowe indukowane w jednorodnym dysku wirnika oraz prądy wirowe generowane w magnesach trwałych, będące wynikiem zawartości wyższych harmonicznych w napięciu indukowanym w uzwojeniach stojana, nie są znaczące. W tabeli 1 zestawiono ważniejsze parametry prototypu generatora tarczowego.

Tabela 1. Parametry prototypu generatora

Rodzaj magnesu	ferryt
Grubość magnesu (d_m)	5mm
Wysokość magnesu (w_m)	29,5mm
Rozpiętość kątowa magnesu (γ)	$\sim 30^\circ$
Indukcja remanentu magnesu (B_r)	0,66T
Promień zewnętrzny wirnika (R_{Rout})	69,2mm
Promień wewnętrzny wirnika (R_{Rin})	17,2mm
Grubość tarczy wirnika (d_r)	3mm
Promień zewnętrzny stojana (R_{Sout})	58mm
Promień wewnętrzny stojana (R_{Sin})	34mm
Grubość tarczy stojana (d_s)	7mm
Liczba zwojów w jednej cewce (N_i)	124
Liczba biegunów wirnika i stojana	8/8
Grubość cewki (d_c)	4mm
Grubość szczeliny powietrznej (δ)	1,5mm
Rezystancja fazy (połączenie szeregowo)	26,9 Ω

2.2. Modele obliczeniowe generatorów

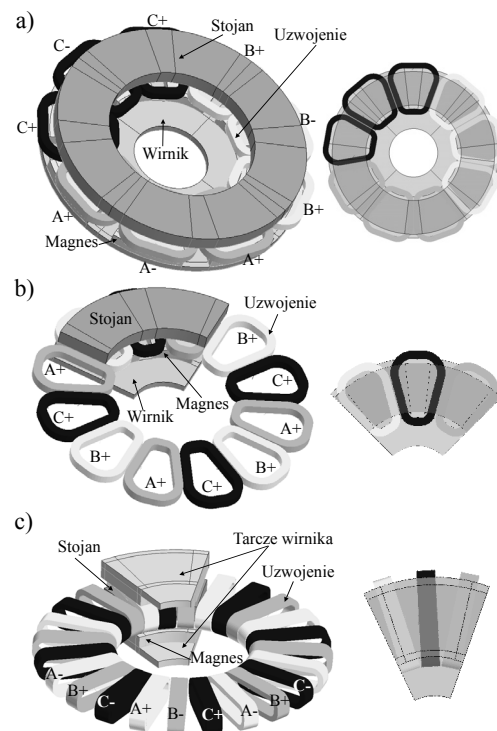
Przeprowadzenie dokładnych obliczeń numerycznych z zastosowaniem modeli generatorów ze strumieniem osiowym wymaga stosowania programu do obliczeń metodą elementów skończonych 3D [11]. Na rysunku 3 pokazano trójwymiarowy model generatora z zaznaczonymi cewkami, magnesem, wirnikiem i stojanem. Zasadniczą wadą konstrukcji generatora z rysunku 3 jest zbyt duża cewka w stosunku do długości pierścienia rdzenia stojana ($R_{Sout} - R_{Sin}$) oraz umiejscowienie znacznej części magnesu ponad rdzeniem stojana. Te wady konstrukcyjne mogą być przyczyną znacznego rozproszenia strumienia, a tym samym obniżenia sprawności generatora.



Rys.3. Model przestrzenny 1-fazowego prototypu generatora przed modyfikacją. Przestrzeń obliczeniowa ograniczona została do jednego bieguna wirnika

Na rysunku 4 przedstawiono zmodyfikowane wersje konstrukcji generatora 1-fazowego z rysunku 3. Zmiana liczby biegunów stojana oraz zastąpienie uzwojenia 1-fazowego uzwojeniem trójfazowym ma istotny wpływ m.in. na wartość pulsacji pola magnetycznego w szczeliny powietrznej, napięcia rotacji oraz sprawność generatora. Ponadto, aby zapewnić lepszy prze-

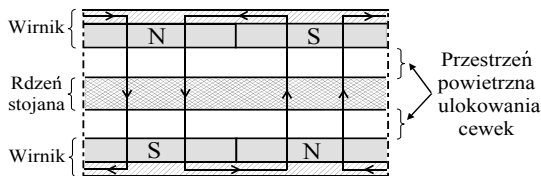
ływ strumienia magnetycznego przez rdzeń stojana i wirnika, we wszystkich modyfikacjach prototypu, obniżono magnesy do rdzenia stojana. Następnie zmniejszono promień zewnętrzny wirnika tak, aby był równy promieniowi zewnętrznemu magnesu oraz przesunięto cewki w kierunku osi badanego generatora tak, aby były usytuowane centralnie na powierzchni rdzenia stojana. Efektem modyfikacji było usytuowanie połączeń czołowych cewek poza zewnętrznym promieniem stojana. Wymiar rdzenia stojana oraz jego grubość (7mm - wymiar wzdłuż osi generatora) są identyczne we wszystkich badanych modelach obliczeniowych generatora.



Rys.4. Przestrzenne modele 3-fazowego generatora tarczowego o 9 biegunach stojana (a), o 12 biegunach stojana (b) oraz o 24 biegunach stojana z podwójnym wirnikiem (c)

Wersja pierwsza wykonanej modyfikacji to generator o dziewięciu biegunach stojana i ośmiu biegunach wirnika - generator 9/8 ($N_i=124$). Druga wersja generatora posiada zwiększoną liczbę biegunów stojana do dwunastu - generator 12/8 ($N_i=124$). W trzecim modelu generatora uwzględniono dodatkowy wirnik złożony z dwóch stalowych tarcz, do których przymocowane zostały magnesy w taki sposób, aby pokrywały całą podziałkę biegunową (osiem magnesów na każdą z tarcz wirnika). Liczbę biegunów stojana zwiększono do 24, nawijając cewki na tarczy stojana. Ze względu na zasto-

sowany rodzaj uzwojenia oraz dwie tarcze wirnika, magnesy umieszczono w ten sposób, aby wektory magnetyzacji magnesów leżących naprzeciw siebie były skierowane osiowo w tym samym kierunku. Strumień magnetyczny wytworzony przez magnes o polaryzacji N z jednej tarczy wirnika wpływa do rdzenia stojana, a następnie do drugiej tarczy wirnika (rys.5).



Rys.5. Rozpliw strumienia magnetycznego w generatorze z podwójnym wirnikiem

Model generatora z podwójnym wirnikiem w dalszej części oznaczono jako generator 24/8 ($N_t=62$). Ze względu na brak sumowania się strumieni w rdzeniu, nie jest wymagana zmiana grubości tarczy rdzenia stojana. Nawet w przypadku zmiany polaryzacji magnesów w taki sposób, że strumienie w rdzeniu stojana sumują się, ze względu na zastosowanie magnesów o małej indukcji remanentu (magnesy nisko-energetyczne) grubość tarczy rdzenia stojana nie wymaga zwiększenia. W przypadku zastosowania magnesów wysoko-energetycznych (NdFeB) należałoby użyć tarcz stojana o około dwa razy większej grubości w celu zmniejszenia ryzyka nasycania się rdzenia.

Ze względu na symetrię pola magnetycznego, przestrzeń obliczeniową dla prototypu z rysunku 3 i dla generatora z podwójnym wirnikiem (rys. 4c) ograniczono do jednej podziałki biegunowej. W przypadku generatora o 12 biegunach stojana (rys. 4b) przestrzeń tą ograniczono do jednej pary biegunów wirnika, natomiast dla generatora o 9 biegunach stojana zbudowano pełny model obliczeniowy generatora (rys. 4a). W celu wyprostowania napięcia indukowanego w uzwojeniach, w badanych generatorach zastosowano mostek diodowy obciążony rezystancyjnie. Wyprowadzenia cewek zostały połączone szeregowo tworząc jedną fazę, lub trzy fazy uzwojenia połączone w gwiazdę. Jako prostownik zastosowano mostek typu GBPC104 822C.

Podstawowe parametry geometryczne prototypu generatora i jego zmodyfikowanych wersji zestawiono w tabeli 2.

W prezentowanych modelach polowo-obwodowych uwzględniono rezystancję wszystkich uzwojeń fazowych stojana. Przy zwiększeniu liczby biegunów stojana zmianie ulegają rozmiary cewek, a tym samym ich rezystancja. Oszacowane wartości rezystancji dla każdej z faz wyniosły odpowiednio: 9,5 Ω dla generatora 9/8; 11,37 Ω dla generatora 12/8 oraz 2,96 Ω dla generatora 24/8 z dwoma wirnikami.

Tabela 2. Parametry badanych generatorów

Badany generator	Parametr [mm]					
	$R_{S\ in}$	$R_{S\ out}$	$R_{R\ in}$	$R_{R\ out}$	$R_{M\ in}$	$R_{M\ out}$
Prototyp 8/8	34	58	17,2	69,2	35,8	65,2
Wersja 9/8	34	58	17,2	60,7	31,3	60,7
Wersja 12/8						
Wersja 24/8						

3. Wybrane wyniki badań

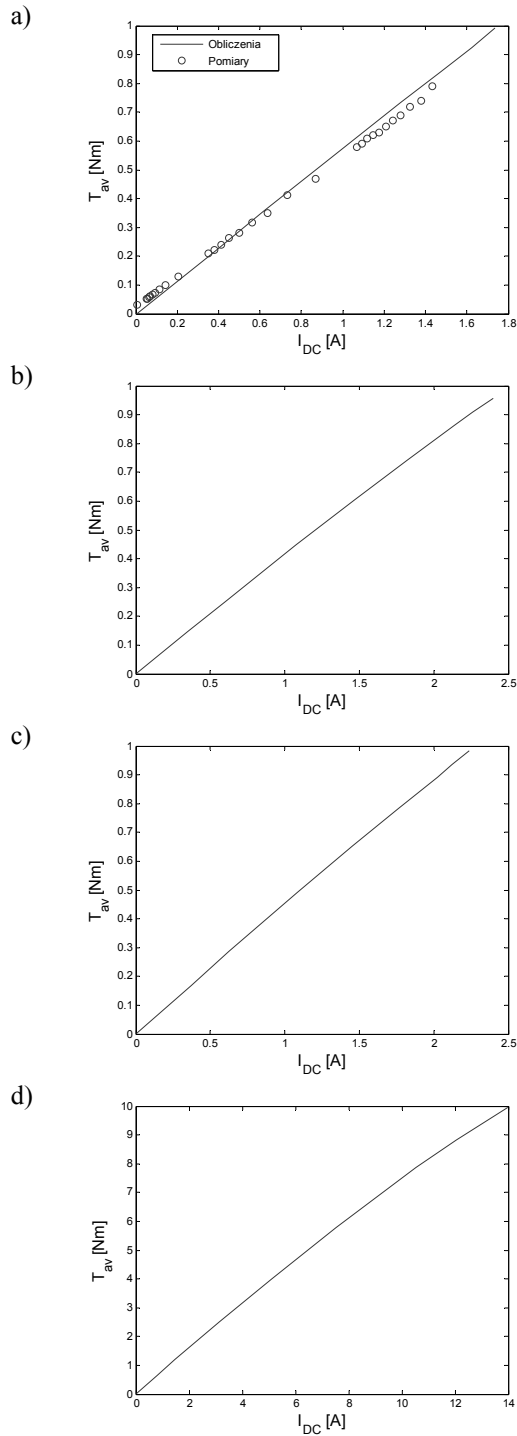
Na rysunkach 6-8 przedstawiono charakterystyki elektromechaniczne prototypu generatora i modeli obliczeniowych po zmianie liczby par biegunów na 9/8 ($N_t=124$), 12/8 ($N_t=124$) oraz 24/8 ($N_t=62$) z podwójnym wirnikiem. W przypadku generatora z podwójnym wirnikiem (24/8) o liczbie zwojów $N_t=124$ w stanie jałowym dla prędkości 1000 obr/min, w uzwojeniach generuje się średnie napięcie równe 162V. W celu ograniczenia napięcia do pożądanej wartości, nieprzekraczającej 84V, oszacowano liczbę zwojów zmniejszając ją do $N_t=62$.

Badane maszyny elektryczne mogą pracować nie tylko przy zmiennych prędkościach, ale również przy zmiennych obciążeniach, zależnie od potrzeb potencjalnych klientów. W związku z tym zbadano wpływ zmiany prędkości obrotowej oraz obciążenia na wybrane parametry funkcjonalne generatora. Pomiar i obliczenia wykonano dla różnych prędkości obrotowych i wartości obciążenia.

Średni moment elektromagnetyczny w funkcji prądu obciążenia I_{DC} (od stanu jałowego do stanu zwarcia) pokazano na rysunku 6.

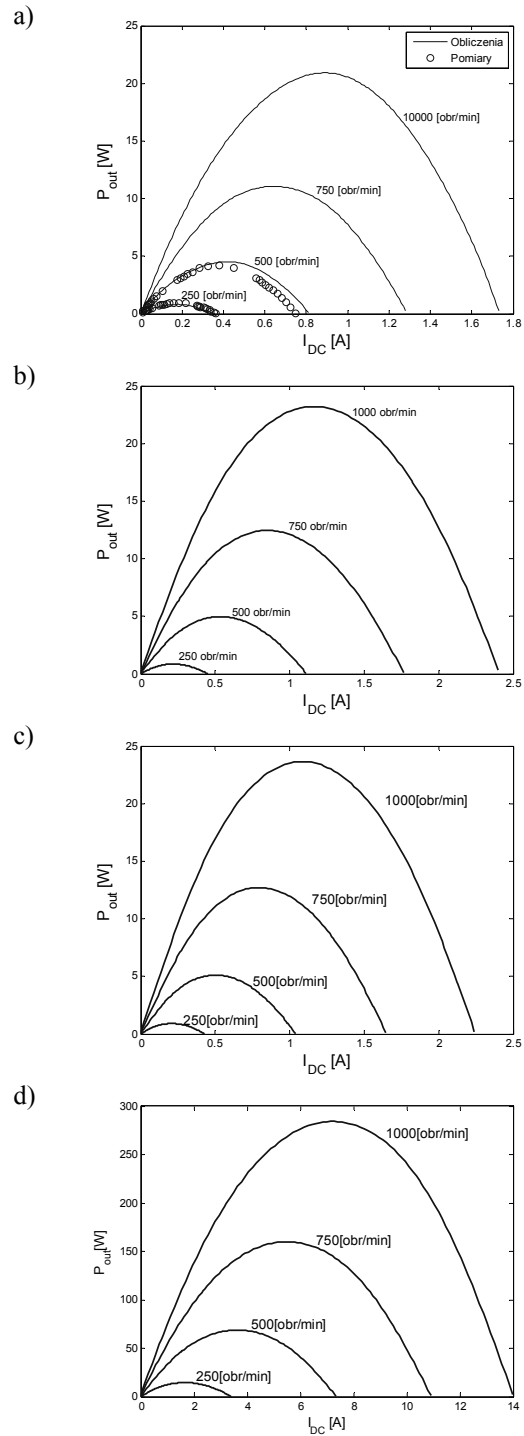
Moc wyjściową generatora $P_{out}=I_{DC}\cdot U_{DC}$ na obciążeniu rezystancyjnym, w funkcji prądu obciążenia I_{DC} dla różnych prędkości obrotowych przedstawiono na rysunku 7.

Rysunek 8 ilustruje zmienność amplitudy napięcia U_{DC} w funkcji prądu I_{DC} w obciążeniu rezystancyjnym.



Rys.6. Charakterystyki średniej wartości momentu elektromagnetycznego w funkcji prądu na obciążeniu dla 1000 obr/min. Prototyp generatora 8/8 (a), generator 9/8 (b), generator 12/8 (c) oraz generator 24/8 (d)

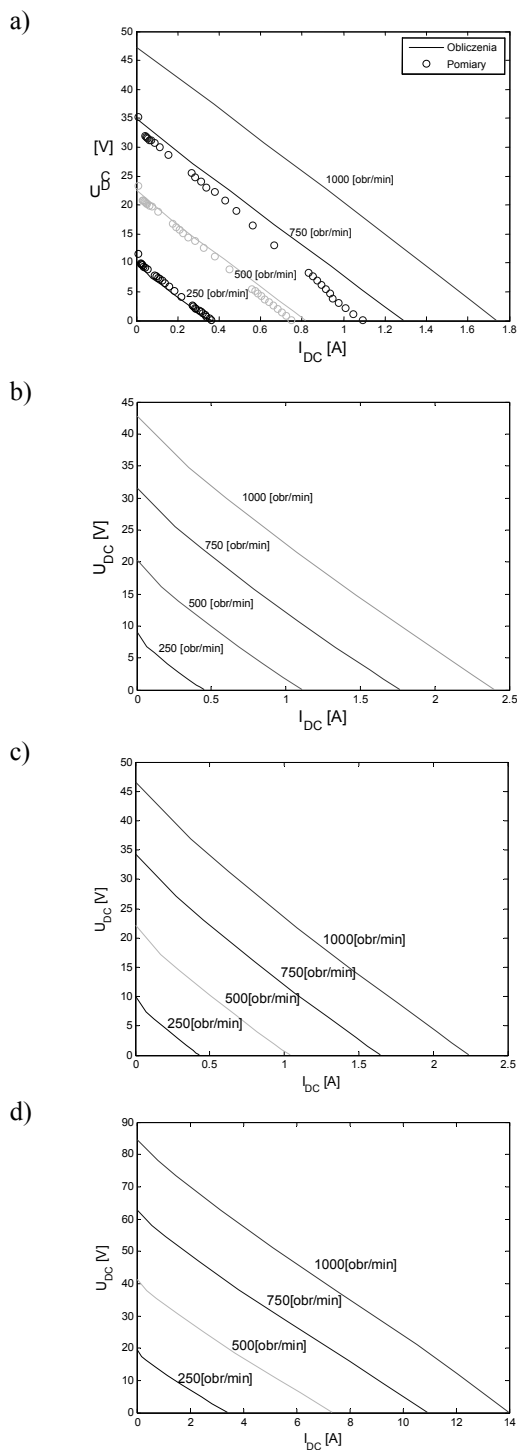
Kolejny rysunek 9 przedstawia wyznaczoną sprawność generatora (z uwzględnieniem mostka prostowniczego) w funkcji prądu obciążenia, dla kilku prędkości obrotowych.



Rys.7. Charakterystyki mocy wyjściowej generatora w funkcji prądu na obciążeniu rezystancyjnym, dla różnych prędkości obrotowych. Prototyp generatora 8/8 (a), generator 9/8 (b), generator 12/8 (c) oraz generator z podwójnym wirnikiem 24/8 (d)

Z pośród omawianych konstrukcji generator z podwójnym wirnikiem jako jedyny wytwarza napięcie rotacji (85V) zdolne do ładowania

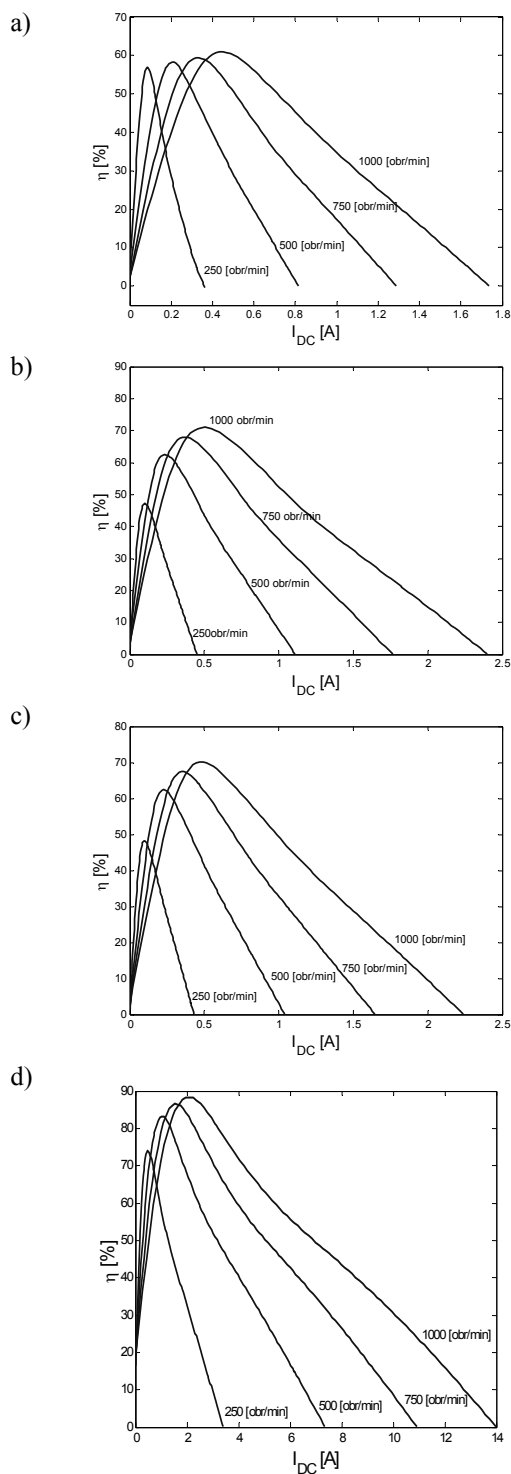
baterii złożonej z założonej liczby akumulatorów.



Rys.8. Charakterystyki napięcia w funkcji prądu na obciążeniu rezystancyjnym, dla różnych prędkości obrotowych. Prototyp generatora 8/8 (a), generator 9/8 (b), generator 12/8 (c) oraz generator 24/8 z podwójnym wirnikiem (d)

Dla generatorów z pojedynczymi wirnikami mimo zwiększenia liczby biegunów i połąc-

zenia cewek w układ 3-fazowy, napięcie rotacji utrzymuje się na poziomie około 45V zbliżonym do prototypu generatora



Rys.9. Sprawność generatora tarczowego z uwzględnieniem strat na mostku prostowniczym w funkcji prądu obciążenia rezystancyjnego dla różnych prędkości wirnika. Prototyp generatora 8/8 (a), generator 9/8 (b), generator 12/8 (c) oraz generator 24/8 z podwójnym wirnikiem (d)

Sprawność generatora zależy głównie od wielkości strat w uzwojeniu stojana, w mniejszym stopniu od strat w rdzeniu stojana i wirnika oraz od strat mechanicznych. Sprawność generatora wyznaczono jako stosunek mocy wyjściowej generatora w obciążeniu P_{out} do mocy wejściowej P_{in} na wale. Moc wejściową P_{in} obliczono jako sumę mocy mechanicznej (wyrażoną jako iloczyn momentu elektromagnetycznego i prędkości kątowej) oraz mocy strat mechanicznych, zależnych od prędkości obrotowej.

W obliczeniach sprawności generatora uwzględniono straty w miedzi oraz w mostku prostowniczym, natomiast pominięto straty w żelazie. Uzyskane sprawności generatorów nie są duże ze względu na niewielką moc maszyn. Maksymalna sprawność badanych generatorów wynosi odpowiednio: $\eta=61\%$ dla generatora prototypowego 8/8, $\eta=71\%$ dla generatora 9/8, $\eta=70,1\%$ dla generatora 12/8 i $\eta=88,4\%$ dla generatora 24/8. Sprawności te obliczono dla prędkości 1000 obr/min, przy założeniu temperatury pracy 20°C . Obniżając prędkość obrotową wirnika w generatorach 3-fazowych w zakresie poniżej 500 obr/min sprawność maksymalna generatorów zmniejsza się poniżej $\eta=60\%$ (rys. 9b-d).

4. Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań prototypu jednofazowego generatora tarczowego z magnesami ferrytowymi w zastosowaniu do elektrowni wiatrowej małej mocy. Wykonano obliczenia numeryczne głównych parametrów funkcjonalnych, które porównano z wynikami pomiarów uzyskując zadawalającą zbieżność. Prototyp generatora został zmodyfikowany w celu wyindukowania odpowiednio wysokiej wartości napięcia rotacji, wystarczającej do naładowania baterii złożonej z kilku połączonych szeregowo akumulatorów oraz uzyskania wyższej mocy wyjściowej i sprawności. Modyfikacja dotyczyła zmiany uzwojenia jednofazowego na trójfazowe ze zwiększoną liczbą biegunów stojana z 8 do 9, 12 i 24.

Wykonane obliczenia wykazały, że sprawność generatora 3-fazowego o jednej tarczy wirnika w zakresie prędkości 750 obr/min – 1000 obr/min wzrosła o 16% w porównaniu z generatorem jednofazowym. W przypadku generatora 24/8 o dwóch wirnikach sprawność wzrosła o 44% w porównaniu z generatorem jednofazowym. Wartość napięcia rotacji we wszystkich badanych generatorach z pojedyn-

czym wirnikiem była zbliżona do uzyskiwanej w generatorze prototypowym, natomiast dla generatora 24/8 z podwójnym wirnikiem uzyskana wartość około dwa razy wyższą.

5. Literatura

- [1] 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 Tran. on Ind. Electr., Vol. 58, No. 9, September 2011, pp. 3795-3805.
- [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] Javadi S., Mirsalim M.: *Design and analysis of 42-V coreless axial-flux permanent – magnet generators for automotive applications*. IEEE Trans on Mag., Vol. 46, No. 4, April 2010, pp. 1015-1023.
- [4] 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.
- [5] Glinka T., Tomaszewicz W.: *Silniki tarczowe*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 80, 2008, s.232-237.
- [6] Glinka T., Jakubiec M.: *Rozwiązania silników tarczowych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 77, 2007, s.243-249.
- [7] Glinka T., Król E., Wolnik T.: *Model polowy bezrdzeniowej maszyny tarczowej*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 86, 2010, s.187-190.
- [8] Glinka T., Król E., Białas A., Wolnik T.: *Silniki tarczowe z magnesami trwałymi*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektr., Nr 87, 2010, s.63-68.
- [9] Giangrande P., Cupertino F., Pellegrino G., Ronchetto D., Gerada C., Sumner M.: *Analysis of two-part rotor, axial flux permanent magnet machines*. Energy Conv. Cong. and Exp. (ECCE), IEEE, 17-22 Sep. 2011, pp.1576-1581.
- [10] Louie H.: *Experiences in the construction of open source low technology off-grid wind turbines*, Power and En. Soci. Gen. Meet., IEEE, July 2011, pp. 1-7.
- [11] Flux 10.3 *Documentation*, 2009, Cedrat Group.

Autorzy

dr inż. Adrian Młot, (077)4498008, a.mlot@po.opole.pl
 Prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn, Politechnika Opolska, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, (077)4498676, m.lukaniszyn@po.opole.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Ignacy Dudzikowski

