

*elektrownia wiatrowa, prądnica wolnoobrotowa*

Zbigniew GORYCA\*, Mariusz MALINOWSKI\*\*,  
Artur PAKOSZ\*\*\*

## **WPŁYW KOMPENSACJI INDUKCYJNOŚCI UZWOJENIA NA NAPIĘCIE WYJŚCIOWE WOLNOOBROTOWEJ PRĄDNICY DO ELEKTROWNI WIATROWEJ**

W pracy przedstawiono konstrukcję wolnoobrotowej prądnicy przeznaczonej do elektrowni wiatrowej o pionowej osi obrotu i wpływ kompensacji indukcyjności uzwojenia na wartość jej napięcia wyjściowego. Ze względu na małe prędkości obrotowe prądnic stosowanych w elektrowniach wiatrowych, ich uzwojenia mają duże liczby zwojów, a zatem i duże indukcyjności. Przy obciążaniu takich prądnic napięcie wyjściowe jest małe z uwagi na duży spadek napięcia na indukcyjności. Sposobem na powiększenie napięcia wyjściowego jest kompensacja indukcyjności uzwojenia przy pomocy kondensatorów. W pracy pokazano wyniki pomiarów takiej kompensacji przeprowadzonych na prototypie wolnoobrotowej prądnicy o mocy 1 kW i prędkości obrotowej 125 obr./min. przeznaczonej do współpracy z turbiną wiatrową typu H-Dariusas.

### **1. WSTĘP**

Wzrost cen energii elektrycznej, unijne dyrektywy zalecające wzrost udziału „zielonej energii” w ogólnej wielkości energii wytwarzanej oraz nowy projekt ustawy o dofinansowaniu odnawialnych źródeł energii powoduje wzrost zainteresowania wykorzystaniem siły wiatru do produkcji tej energii. Duża grupa odbiorców indywidualnych zainteresowana jest małymi konstrukcjami przeznaczonymi do zasilania domów jednorodzinnych lub przeznaczonymi do wspomagania systemów grzewczych w takich domach. W celu obniżenia kosztów i podwyższenia sprawności przetwarzania energii wiatru w energię elektryczną buduje się bezprzekładniowe konstrukcje [1], [4], [6], [8], w których turbina wiatrowa mocowana jest bezpośrednio na wale prądnicy. Szczególnym zainteresowaniem cieszą się małe elektrownie wiatrowe o pionowej osi

---

\* Wydział Transportu i Elektrotechniki, Politechnika Radomska.

\*\* Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska.

\*\*\* Zespół Szkół Elektronicznych w Radomiu.

obrotu, które można umieszczać na dachach budynków. Turbiny tego typu charakteryzują się małymi prędkościami obrotowymi i dzięki temu hałas wywołany przez nie jest niewielki i mało uciążliwy dla otoczenia. Mała prędkość obrotowa takich turbin powoduje konieczność budowy wolnoobrotowych, wielobiegunowych prądnic. W pracy przedstawiono konstrukcję takiej prądnicy zapewniającą mały moment zaczepowy co pozwala na start elektrowni przy małej prędkości wiatru. Zaletą tej prądnicy jest także mała masa wynikająca z zastosowania lekkiego wirnika. Unikalna, opatentowana konstrukcja [6] obwodu magnetycznego pozwala uzyskać wyjątkowo mały moment zaczepowy przy prostych zębach blach stojana i przy braku skosu magnesów. Dzięki temu można efektywnie wykorzystać powierzchnię żłobka i nie ma kłopotów związanych z wykonaniem uzwojenia tak, jak w przypadku stojanów o skośnych żłobkach.

## 2. KONSTRUKCJA PRĄDNICY

Przy projektowaniu prądnicy przyjęto następujące, podstawowe założenia:

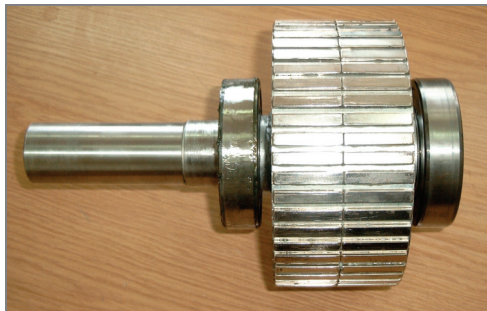
- moc prądnicy 1 kW,
- napięcie wyjściowe  $3 \times 230$  V,
- częstotliwość 50 Hz,
- prędkość obrotowa 125 obr/min.

Tak mała prędkość obrotowa wynika z zastosowania do napędu prądnicy wolnobieżnej, trójłopatowej turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu typu H-Darius. Jeżeli założymy, że częstotliwość napięcia wyjściowego ma być równa 50 HZ to przy prędkości obrotowej 125 obr/min. musimy mieć prądnicę o liczbie biegunów 48. Głównym problemem w wielobiegunowych maszynach z magnesami trwałymi jest duży moment zaczepowy [1], [2], [3], [5], [7], [9] wynikający z dużej liczby biegunów. Przykładowo moment ten w prądnicie produkcji BOBRME KOMEL wynosi 8 Nm [9]. Tak duży moment zaczepowy wywołuje drgania maszyny podczas pracy i związany z nimi hałas. Najprostszym i najczęściej stosowanym sposobem minimalizacji tego momentu jest stosowanie skosu żłobków stojana [2], [7]. Można go jednak stosować w przypadkach, gdy długość pakietu blach stojana jest znaczna. Przy małej długości pakietu następuje wyraźne ograniczenie powierzchni użytkowej żłobka i trudności z umieszczeniem w nim uzwojenia. Często stosowanym sposobem minimalizacji momentu zaczepowego jest wykonywanie skosu lub pseudoskosu (kilka magnesów na długości wirnika przesuniętych względem siebie o określony kąt) magnesów [5]. Rozwiązanie to wymaga jednak drogich przyrządów do klejenia magnesów i nie daje tak dobrych efektów jak skos zębów stojana. W przedstawionej konstrukcji minimalizację momentu zaczepowego uzyskano przez zastosowanie nietypowej, nieparzystej liczby zębów stojana różnej o trzy od liczby biegunów magnetycznych wirnika. Obliczenia projektowe modelu płaskiego wykonano przy użyciu programu COMSOL

Multiphysics w wersji 3.3. Poniższe zdjęcia pokazują konstrukcje stojana, wirnika i widok wykonanego prototypu prądnicy.



Rys. 1. Uzwojony stojan prądnicy  
– widoczne proste żłobki  
Fig. 1. Winding of the stator  
– apparent straight grooves



Rys. 2. Widok wirnika z przyklejonymi magnesami  
Fig. 2. The view of the rotor with glued magnets

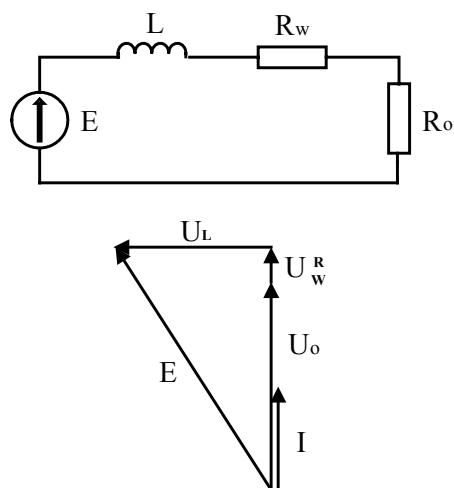


Rys. 3. Widok wykonanego prototypu prądnicy  
Fig. 3. The view of the prototype of generator

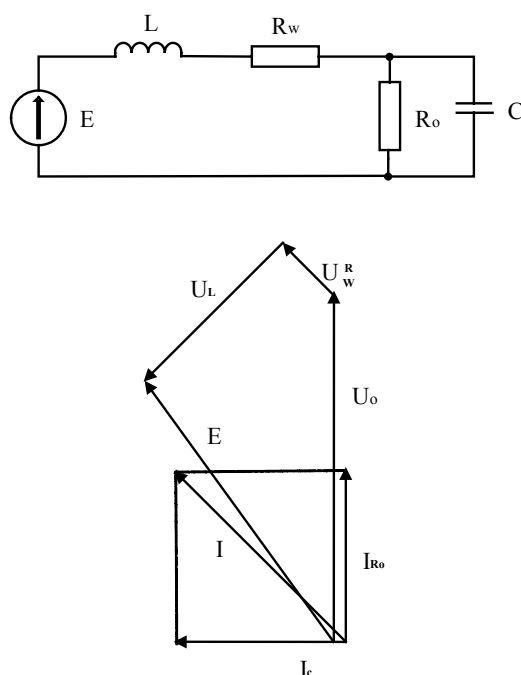
### 3. WPŁYW DOŁĄCZANYCH POJEMNOŚCI NA NAPIĘCIE WYJŚCIOWE PRĄDNIICY

Napięcie wyjściowe prądnicy zależy od indukcji w szczelinie, od prędkości obrotowej oraz od liczby zwojów w uzwojeniu. Przy małej prędkości obrotowej i przy wysokim napięciu wyjściowym uzwojenie prądnicy musi mieć dużą liczbę zwojów

i związaną z tym znaczną indukcyjność, a zatem spadek napięcia na  $x_L$  będzie znaczny. Można to przedstawić na wykresie fazorowym pokazanym poniżej. W celu kompensacji spadku napięcia na indukcyjności uzwojenia, do wyjścia prądnicy włączono kondensatory o różnych pojemnościach i badano wpływ tych pojemności na napięcie wyjściowe. Jak widać z rysunku nr 5, przy dużych wartościach pojemności można uzyskać napięcie wyjściowe przewyższające napięcie biegu jałowego  $E$ , jednak jest to okupione znacznym zwiększeniem prądu i grzaniem uzwojenia prądnicy. Dla konkretnego przypadku obciążenia należy wybrać rozsądny kompromis między szkodliwym zwiększaniem prądu w uzwojeniu prądnicy, a pożądanym zwiększeniem napięcia wyjściowego.

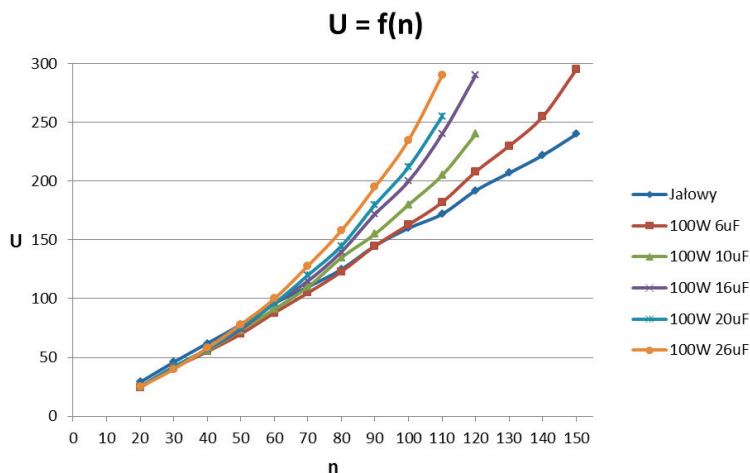


Rys. 4. Schemat zastępczy i wykres fazorowy prądnicy obciążonej rezystancyjnie  
Fig. 4. Equivalent circuit of generator and vector diagram of generator loaded with resistance



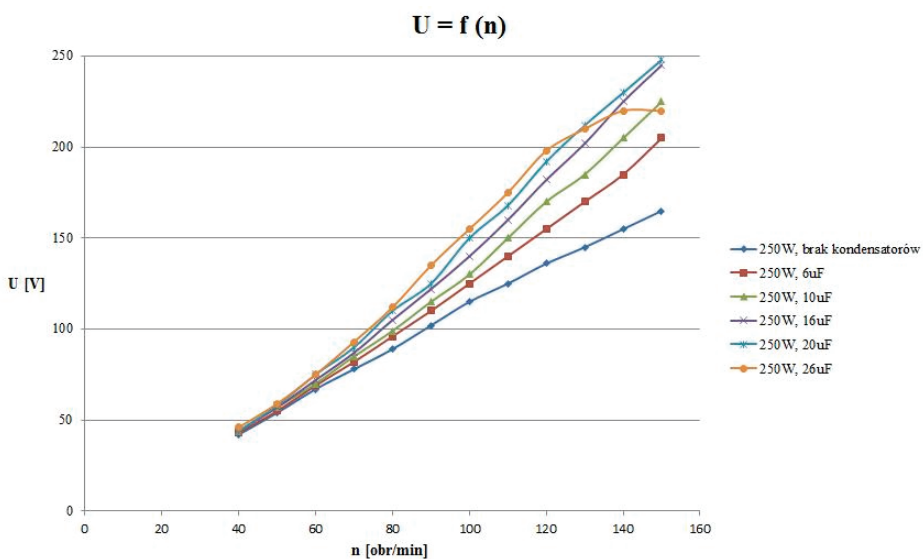
Rys. 5. Schemat zastępczy i wykres fazorowy prądnicy z kompensacją  
Fig. 5. Equivalent circuit of generator and vector diagram of generator with compensation

Na rysunku 6 pokazano wyniki pomiarów uzyskanych przy obciążeniu prototypowej prądnicy żarówkami o łącznej mocy 300 W.



Rys. 6. Zależność napięcia wyjściowego prądnicy od prędkości obrotowej przy obciążeniu 300 W  
 Fig. 6. The dependence of line-to-line voltage on rotational speed with load 300 W

Jak widać, przy niewielkim obciążeniu prądnicy dołączenie nawet niewielkiego kondensatora powoduje w tym przypadku znaczne – kilkudziesięcioprocentowe zwiększenie napięcia wyjściowego. Przy większym obciążeniu prądnicy (750 W) różnice napięć wyjściowych są mniejsze.



Rys. 7. Zależność napięcia wyjściowego prądnicy od prędkości obrotowej przy obciążeniu 750 W  
 Fig. 7. The dependence of line-to-line voltage on rotational speed with load 750 W

#### 4. WNIOSKI

Wolnoobrotowe, bezprzekładniowe prądnice z magnesami trwałymi znajdują coraz częstsze zastosowanie w małych elektrowniach wiatrowych przeznaczonych do wspomagania układu grzewczego domów jednorodzinnych. Uzyskiwana z nich energia może znacząco poprawić bilans energetyczny domu i przyczynić się do obniżenia rachunków za energię. Prezentowana w pracy konstrukcja ma mały moment zaczepowy przy prostych żłóbkach stojana i prostych magnesach. Dzięki temu elektrownia wiatrowa startować będzie już przy słabych wiatrach. Zaletą jest także mała prędkość obrotowa – 125 obr/min. co pozwala umieścić turbinę wiatrową bezpośrednio na wale prądnicy. Przedstawiona konstrukcja charakteryzuje się także małą masą.

*Praca została wykonana w ramach projektu rozwojowego nr N R01 0015 06/2009 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.*

#### LITERATURA

- [1] CZUCZMAN J., CZEREPANJAK M., SCZUR I., GOLUBOWSKI P., *Generatory synchroniczne do autonomicznych, bezprzekładniowych elektrowni wiatrowych*, XII Konferencja „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ustroń, 18–20 maja, 2005.
- [2] GAJEWSKI M., *Analiza pulsacji momentu w silnikach bezszczotkowych z magnesami trwałymi*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, 2007.
- [3] GLINKA T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [4] GORYCA Z., *Wolnoobrotowy generator tarczowy do małej elektrowni wiatrowej*, XVI Konferencja „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ryto, 28–30 maja, 2008.
- [5] GORYCA Z., MŁODZIKOWSKI P., *Analiza konstrukcji bezprzekładniowych prądnic do małych elektrowni wiatrowych*, Konferencja Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki” PPEEm, Wisła, 14–17.12.2009.
- [6] GORYCA Z., MALINOWSKI M., PAKOSZ A., *Wielobiegunowa maszyna z magnesami trwałymi o zredukowanym momencie zaczepowym*, Zgłoszenie patentowe nr P-395663 z dnia 15.07.2011.
- [7] ŁUKANISZYN M., MŁOT A., *Analiza momentu elektromagnetycznego i składowych pulsacji w bezszczotkowym silniku prądu stałego wzbudzonym magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 2005, nr 10.
- [8] POLAK A., BEŻAŃSKI A., *Małe elektrownie wiatrowe-przykłady praktycznego zastosowania*, XII Konferencja „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ustroń, 18–20 maja, 2005.
- [9] ROSSA R., BIAŁAS A., *Prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi do przydomowych elektrowni wiatrowych*, XX Konferencja „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ryto, 25–27 maja, 2011.

THE INFLUENCE OF INDUCTANCE COMPENSATION OF WINDING  
ON THE VOLTAGE GENERATED BY LOW SPEED WIND POWER PLANT GENERATOR

The paper presents the construction of multipole low speed generator destined to wind power plant of vertical axis. Due to low rotational speed – 125 rev/min and necessity of generation of voltage of 230 V, winding of this generator consists of many coils causing a significant increase of its inductance. At the load of generator, a high voltage drop in the winding reactance takes place what in turn causes the significant reduction of output voltage generated by the generator. The voltage drop in the reactance can be compensated by parallel connection of capacitors, however it cause an increase of current being drawn from the generator and heating of winding. The paper presents also the influence of the capacitance on the output voltage of generator.