

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Robert Rossa  
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

## PRĄDZNICA WZBUDZANA MAGNESAMI TRWAŁYMI Z DZIELONYM UZWOJENIEM TWORNIKA

### PERMANENT MAGNET GENERATOR WITH SPLIT ARMATURE WINDING

**Streszczenie:** Elektrownia wytwarza więcej energii elektrycznej, jeśli turbina wiatrowa i sprzęgnięty z nią generator synchroniczny pracują z prędkością obrotową dostosowaną do prędkości wiatru według kryterium maksymalnej mocy. Napięcie prądnic powinno być możliwie duże zarówno przy małej prędkości obrotowej jak i przy prędkości znamionowej. Uzyskuje się to poprzez podzielenie uzwojenia twornika prądnic na sekcje i łączenie sekcji uzwojenia, w czasie pracy prądnic, szeregowo bądź równoległe. W artykule przedstawiono prądnicę wzbudzaną magnesami trwałymi z uzwojeniem twornika podzielonym na dwie sekcje i trzy sekcje. Sekcje uzwojenia są łączone wyłącznikami elektromechanicznymi. Sterownik mikroprocesorowy mierzy parametry pracy prądnic: napięcie, prąd, częstotliwość i steruje załączaniem i wyłączaniem wyłączników.

**Abstract:** The power plant generates more electricity if the wind turbine and the synchronous generator associated with it operate at a speed adapted to the wind speed according to the maximum power criterion. The generator voltage should be as high as possible at both low speed and rated speed. This is achieved by dividing the generator armature winding into sections and connecting the winding sections, during generator operation, in series or in parallel. The article presents a permanent magnet generator with armature winding divided into two sections and three sections. Winding sections are connected by electromechanical switches. The microprocessor controller measures the generator's operating parameters: voltage, current, frequency and controls the switching on and off of circuit breakers.

**Słowa kluczowe:** elektrownia wiatrowa, prądnic synchroniczna, magnesy trwałe, uzwojenie twornika.

**Keywords:** wind farm, synchronous generator, permanent magnets, armature winding

### 1. Wymagania dla prądnic w elektrowniach wiatrowych

Prądnic wzbudane magnesami trwałymi mają strumień wzbudzenia o wartości stałej. Napięcie rotacji prądnic i częstotliwość napięcia są liniową funkcją prędkości obrotowej. W elektrowniach wiatrowych korzystnie jest, aby turbina wiatrowa pracowała ze zmienną prędkością obrotową, uzależnioną od prędkości wiatru. Jeśli moc strumienia powietrza, w powierzchni obrotowej turbiny, jest równa  $P_0$ , a prędkości strumienia powietrza przed i za turbiną są równe odpowiednio  $V_1$  i  $V_2$ , to moc turbiny określa zależność:

$$P_t = \frac{1}{2} P_0 \left( 1 + \frac{V_2}{V_1} \right) \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right]$$

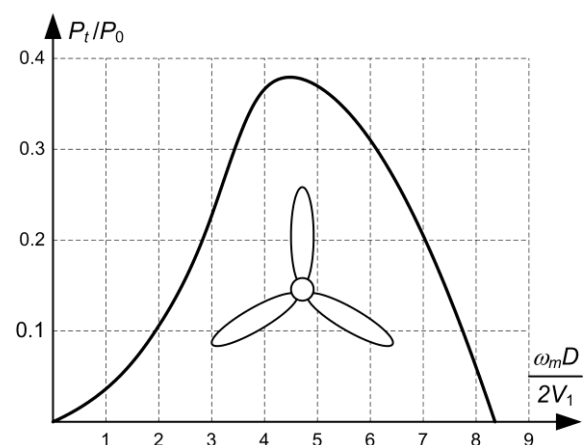
Minimalna średnia wartość prędkości wiatru za silnikiem wiatrowym  $V_2$ , którą można uzyskać, określona jest zależnością:

$$V_{2 \min} = 0,75V_1$$

co daje moc maksymalną turbiny

$$P_{t \max} = 0,38P_0$$

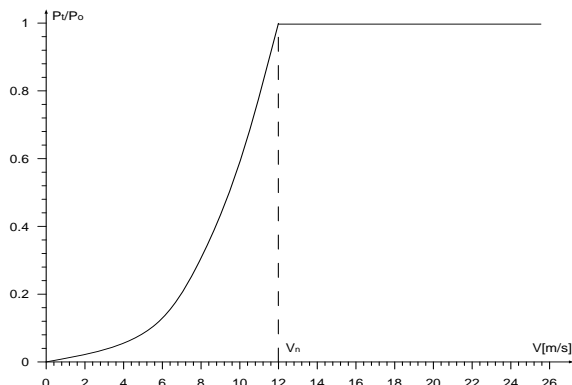
Moc rzeczywista turbiny o średnicy łopat  $D$  i prędkości kątowej łopat  $\omega_m$ , zależy od konstrukcji i od stosunku prędkości obwodowej łopaty do prędkości wiatru  $\left( \frac{\omega_m D}{2V_1} \right)$  - rysunek 1,



Rys. 1. Charakterystyka  $\frac{P_t}{P_0} = f\left(\frac{\omega_m D}{2V_1}\right)$  turbiny trzyłopatowej

Turbina wiatrowa pozyskuje maksymalną moc ze strugi wiatru tylko wówczas, gdy jej prędkość

kość obrotowa jest dopasowana do prędkości wiatru. Moc znamionowa elektrowni wiatrowych jest dobierana na prędkość wiatru, np. 12 m/s. Praca elektrowni w zakresie prędkości wiatru od 4 do 12 m/s powinna być realizowana z mocą maksymalną turbiny, a powyżej prędkości wiatru 12 m/s ze stałą mocą, równą mocy znamionowej, jak to pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Wykres wykorzystania mocy turbiny w funkcji prędkości wiatru

Aby pozyskiwać moc maksymalną z turbiny, w zakresie prędkości wiatru  $V_1 < 12$  m/s,

$$\left(\frac{P_t}{P_0}\right)_{max} = 0,37,$$

wskazuje to wykres pokazany na rysunku 1, to prędkość obrotowa turbiny  $\omega_m$  musi być dostosowana do prędkości wiatru  $V_1$

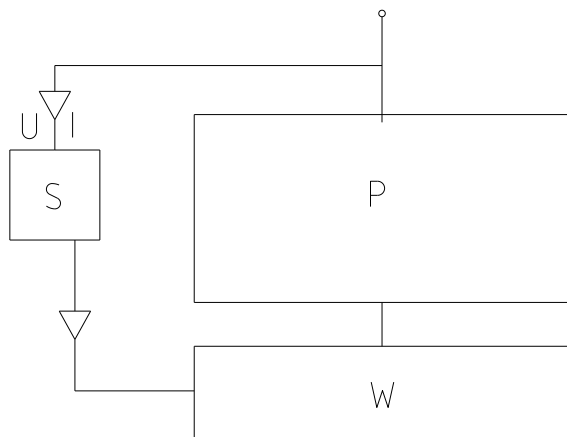
$$\omega_m = 4,5 \cdot 2 \frac{V_1}{D}$$

Przy małych prędkościach wiatru,  $V_1 < 12$  m/s, prędkość turbiny powinna być mała, a przy dużych prędkościach wiatru  $V_1 \geq 12$  m/s, prędkość turbiny powinna być równa prędkości znamionowej. Podobnie turbina wodna powinna mieć dostosowaną prędkość obrotową do ciśnienia wody. Aby efektywnie przetworzyć moc mechaniczną turbiny wiatrowej bądź turbiny wodnej na energię elektryczną, prądnica powinna być dostosowana do pracy przy zmiennej prędkości obrotowej turbiny. Przy małej prędkości obrotowej uzwojenie twornika prądnicy powinno mieć dużo zwojów, aby napięcie na zaciskach prądnicy było możliwie duże, natomiast przekrój uzwojenia (tzn. wypełnienie żłobka twornika miedzią) może być mniejszy, gdyż moc i prąd nie są duże. Przy dużej prędkości obrotowej liczba zwojów uzwojenia powinna być odpowiednio mniejsza, natomiast przekrój uzwojenia odpowiednio więk-

szy. Prądnice przeznaczone do współpracy z turbinami wiatrowymi o standardowym wykonaniu uzwojenia twornika posiadają uzwojenie o stałej liczbie zwojów i stałym przekroju, dostosowane do jednej prędkości obrotowej, najczęściej odpowiadającej prędkości wiatru 12 m/s. Z opisów patentowych: WO 2017/180850 A1 [4], US 2016/0036308 A1 [2] i US 2006/0220486 A1 [3] znane są prądnice, w których każde pasmo fazowe uzwojenia jest podzielone na kilka sekcji. Sekcje uzwojenia są łączone: szeregowo, równoległe i szeregowo-równoległe, za pomocą łączników elektronicznych. Układy elektroniczne są znacznie droższe od wyłączników elektromechanicznych, poza tym w uzwojeniach wysokiego napięcia nie można ich stosować. Zachodzi zatem potrzeba konstrukcji prądnic możliwie tanich i przystosowanych do współpracy z turbinami wiatrowymi i wodnymi pracującymi ze zmienną prędkością obrotową. Rozwiązanie takiej prądnicy przedstawiono w zgłoszeniu patentowym P.423923 z dnia 18.12.2017 [1].

## 2. Prądnica z dzielonym uzwojeniem twornika

Prądnica synchroniczna z dzielonym uzwojeniem twornika jest trójfazowa i jest wzbudzana magnesami trwałymi. Prądnica jest przystosowana do pracy przy zmiennej prędkości obrotowej. Wymaganie stawiane prądniczy to generacja możliwie dużego napięcia przy zmiennej prędkości wiatru  $V_1 \leq 12$  m/s. Funkcja ta jest realizowana poprzez podzielenie uzwojenia twornika na dwie lub trzy sekcje i przy małej prędkości obrotowej łączenie sekcji szeregowo, a przy prędkości znamionowej łączenie sekcji równoległe. Łączenie sekcji realizują wyłączniki elektromechaniczne **W**. Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy zespołu elektromechanicznego odbierającego moc z turbiny wiatrowej. Zespół ten obejmuje prądnicę **P**, sterownik mikroprocesorowy **S** i wyłączniki elektromechaniczne **W**. Sterownik **S** mierzy parametry pracy prądnicy **P**: napięcie  $U$ , prąd  $I$ , częstotliwość  $f$  i steruje załączaniem wyłączników **W**. Napięcie  $U$  i częstotliwość  $f$  prądnicy są zależne od prędkości obrotowej, zatem połączenie prądnicy z siecią elektroenergetyczną jest poprzez falownik.



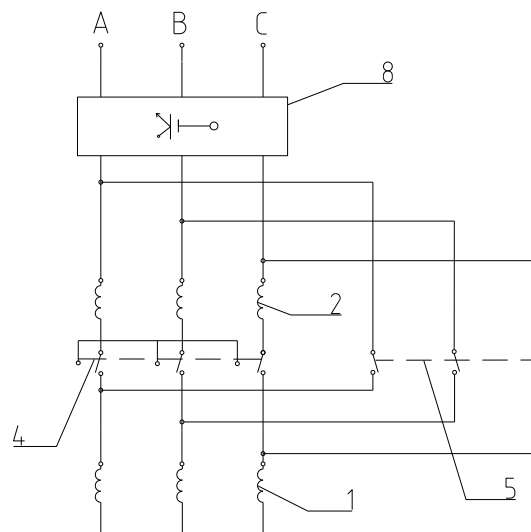
Rys. 3. Schemat blokowy zespołu elektromechanicznego odbierającego moc z turbiny wiatrowej: **P** – prądnicą, **W** – wyłączniki, **S** – sterownik mikroprocesorowy

Prądnicę **P** z uzwojeniem twornika podzielonym na dwie sekcje **1** i **2** przedstawiono na rysunku 4. Sekcje te mogą być łączone szeregowo lub równoległe. Łączenie sekcji w układ szeregowy realizuje wyłącznik trójbiegunowy **4** (trójzaczaskowy), przy wyłączniku **5** otwartym. Łączenie równoległe sekcji realizuje wyłącznik dwubiegunowy **5**, przy wyłączniku **4** otwartym. Połączenie końcówek sekcji uzwojenia z wyłącznikami jest następujące:

- końce pierwszej sekcji **1** uzwojenia są zwarte, a początki uzwojenia sekcji **1** są połączone ze stykami stałymi wyłącznika **4** oraz z wyłącznikiem **5**;
- do styków ruchomych wyłącznika **4** są dołączone końce drugiej sekcji **2** uzwojenia;
- trzecie styki nieruchome wyłącznika **4** są zwarte;
- drugie styki wyłącznika dwubiegunowego **5** są połączone z początkami uzwojenia sekcji **2**.

Schemat połączenia uzwojenia podzielonego na dwie sekcje pokazano na rysunku 4. Wyłączniki **4** i **5** muszą być wzajemnie blokowane. Gdy wyłącznik **4** łączy sekcje szeregowo, to wyłącznik **5** musi być otwarty. Gdy wyłącznik **4** łączy sekcję **2** uzwojenia w układ gwiazdy, to wyłącznik **5** jest zamknięty i łączy równoległe sekcje uzwojenia **1** i **2**.

Napięcie wyjściowe prądnicy jest przetwarzane przez przekształtnik AC/DC/AC **8** na napięcie i częstotliwość sieci elektroenergetycznej.

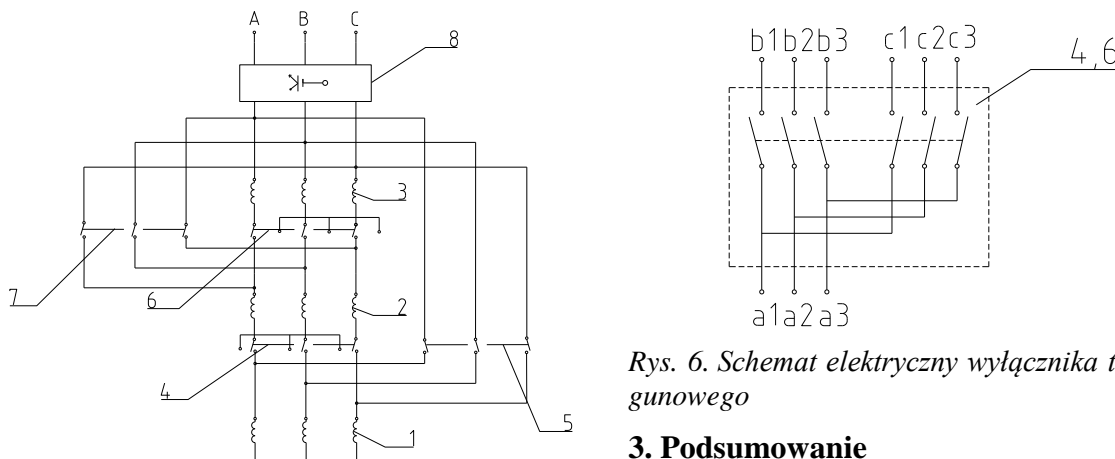


Rys. 4. Uzwojenie twornika prądnicy **P** jest podzielone na dwie sekcje

W prądnicy z uzwojeniem twornika podzielonym na trzy sekcje **1**, **2**, **3**:

- końce pierwszej sekcji **1** uzwojenia są zwarte, a początki sekcji **1** są połączone ze stykami stałymi wyłącznika trójbiegunowego **4** oraz z wyłącznikiem dwubiegunowym **5**,
- do styków ruchomych wyłącznika **4** są dołączone końce drugiej sekcji **2** uzwojenia, a trzecie styki nieruchome wyłącznika **4** są zwarte,
- drugie styki wyłącznika dwubiegunowego **5** są połączone z początkami trzeciej sekcji **3** uzwojenia, a także początki sekcji **2** uzwojenia są połączone ze stykami stałymi wyłącznika trójbiegunowego **6** oraz z wyłącznikiem dwubiegunowym **7**,
- do styków ruchomych wyłącznika trójbiegunowego **6** są dołączone końce sekcji **3** uzwojenia, a trzecie styki nieruchome wyłącznika **6** są zwarte,
- drugie styki wyłącznika dwubiegunowego **7** są połączone z początkami uzwojenia sekcji **3**.

Schemat połączenia sekcji **1**, **2** i **3** uzwojenia z wyłącznikami **4** i **5** oraz **6** i **7** pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat połączenia uzwojenia o trzech sekcjach z wyłącznikami

Wyłączniki **4** i **5** oraz **6** i **7** muszą być wzajemnie blokowane. Gdy wyłączniki **4** i **6** łączą sekcje szeregowo, to wyłączniki **5** i **7** muszą być otwarte. Gdy wyłączniki **4** i **6** łączą sekcje uzwojenia w układ gwiazdy, to wyłączniki **5** i **7** są zamknięte i łączą sekcje uzwojenia równolegle. Także w tym układzie napięcie wyjściowe prądnicy jest przetwarzane przez przekształtnik AC/DC/AC **8** na napięcie i częstotliwość sieci elektroenergetycznej.

Przedstawione układy umożliwiają uzyskanie dwóch wariantowych układów połączenia uzwojenia: szeregowego i równoległego. Uzwojenie może być podzielone na więcej sekcji. Podział uzwojenia na cztery sekcje umożliwia uzyskanie trzech wariantów połączenia sekcji: szeregowo, mieszane i równoległe. W układzie szeregowym wszystkie sekcje są połączone szeregowo. W układzie mieszanym sekcje pierwsza i druga oraz sekcje trzecia i czwarta są połączone szeregowo i te podwójne sekcje są połączone równoległe. W układzie równoległym wszystkie sekcje są połączone równoległe.

Wyłączniki trójbiegunowe **4** i **6** mogą być zrealizowane poprzez połączenia dwóch wyłączników dwubiegunowych wzajemnie blokowanych, jak to pokazano na rysunku 6. Styki ruchome wyłączników **4** i **6** oznaczono **a1**, **a2**, **a3**, a styki nieruchome oznaczono **b1**, **b2**, **b3** oraz **c1**, **c2**, **c3**.

Rys. 6. Schemat elektryczny wyłącznika trójbiegunowego

### 3. Podsumowanie

Elektrownia wiatrowa wytwarza więcej energii elektrycznej jeśli turbina wiatrowa i sprzęgnięty z nią generator synchroniczny pracują ze zmienną prędkością obrotową, dostosowaną do prędkości wiatru według kryterium maksymalnej mocy. Podobnie turbina wodna powinna mieć dostosowaną prędkość obrotową do ciśnienia wody. Połączenie turbiny wiatrowej bądź turbiny wodnej pracującej ze zmienną prędkością obrotową, z prądnicą z uzwojeniem twornika podzielonym na sekcje, pozwala uzyskać maksymalną efektywność energetyczną elektrowni.

Napięcie prądnicy powinno być możliwie duże zarówno przy małej prędkości obrotowej jak i przy prędkości znamionowej, gdyż wówczas łatwo go przetworzyć na napięcie i częstotliwość sieci elektroenergetycznej. Uzyskuje się to poprzez podzielenie uzwojenia twornika prądnicy na sekcje i łączenie sekcji uzwojenia, w czasie pracy prądnicy, szeregowo bądź równoległe. Przy małych prędkościach obrotowych wszystkie sekcje uzwojenia są połączone szeregowo, napięcia sekcji dodają się, przemiennik częstotliwości ma odpowiednio wyższe napięcie na wejściu. Przy większych prędkościach wiatru sekcje uzwojenia są połączone równoległe, wówczas prąd przemiennika jest sumą prądów w sekcjach uzwojenia.

Prądnicą z uzwojeniem podzielonym na sekcje pracującą przy zmiennej prędkości obrotowej turbiny wiatrowej bądź turbiny wodnej, może pozyskiwać więcej energii elektrycznej i przekazywać ją do odbiorców.

### Literatura

- [1]. J. Bernatt, S. Gawron, T. Glinka, R. Rossa: „Prądnicą wzbudzana magnesami trwałymi”, P.423923 z dnia 18.12.2017 r.

- [2]. James L. Bailey, Harley C. McDonald: Variable torque motor/generator/transmission. Patent US 2016/0036308 A1 z 04.02.2016 r.
- [3]. Toshihito Mlyashita, Shintarou Koichi, Kazuyoshi Murata, Masanori Sakai: Multi-winding motor. Patent US 2006/0220486 A1 z 05.10.2006 r.
- [4]. McDonald Harley C., Bailej Jams L., McDonald Matthew C.: Variable torque motor/generator/transmission. Patent WO 2017/180850 A1 z 19.10.2017 r.
- [5]. T.Wolnik, A.Białas, "Wolnoobrotowy, bezrdzeniowy generator tarczowy o mocy 2 kW", *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 89/2011 (108), str. 127-132.
- [6]. P.Pistelok, R.Rossa, „Generator z magnesami trwałymi do pracy w agregacie prądowórczym”, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr 66, Studia i Materiały nr 33, str. 176-181, tom 1.
- [7]. P.Pistelok, R.Rossa, „Generatory synchroniczne z magnesami trwałymi dedykowane dla małych elektrowni wodnych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2/2015 (106).
- [8]. R.Rossa, P.Pistelok., A.Dąbrowski, „Projekt prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi do odnawialnych źródeł energii”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3/2012 (96).
- [9]. R.Rossa, T.Wolnik, „Obliczenia charakterystyk obciążenia prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi – porównanie wyników szybkiej metody polowo-obwodowej z wynikami analizy MES dla stanów przejściowych”, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr 66, Studia i Materiały nr 32, Wrocław 2012.
- [10]. "Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 1/2016 (109)

### **Autorzy**

dr hab. inż. Jakub Bernatt, prof. KOMEL  
dyrekcja@komel.com.pl  
Sieć Badawcza Łukasiewicz  
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych  
KOMEL

dr inż. Stanisław Gawron  
s.gawron@komel.com.pl  
Sieć Badawcza Łukasiewicz  
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych  
KOMEL

prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka  
t.glinka@komel.com.pl  
Sieć Badawcza Łukasiewicz  
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych  
KOMEL

dr inż. Robert Rossa  
r.rossa@komel.katowice.pl  
Sieć Badawcza Łukasiewicz  
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych  
KOMEL