

# Przydomowa elektrownia z wielołopatową turbiną wiatrową

Zbigniew Goryca

## 1. Wstęp

Małe elektrownie wiatrowe są coraz częściej stosowane jako dodatkowe źródło energii wspomagające system energetyczny domu jednorodzinnego [1, 2, 4, 9, 10]. Źródło to można wykorzystać do podgrzewania wody w układzie centralnego ogrzewania lub można oddawać energię elektryczną bezpośrednio do sieci energetycznej. W świetle ostatnio uchwalonych poprawek do ustawy o OZE (z 22 czerwca 2016 r.) ten drugi sposób wykorzystania energii wiatrowej jest najbardziej korzystny. Małe elektrownie wiatrowe instalowane są na masztach o wysokościach rzędu kilkunastu metrów i na ogół pracują przy małych prędkościach wiatru. W takich warunkach najlepiej sprawdzają się elektrownie wiatrowe z turbinami wielołopatowymi. W artykule pokazano budowę małej elektrowni wyposażonej w pięciołopatową turbinę wiatrową o poziomej osi obrotu. Turbina ta założona jest bez przekładni na wał generatora zaprojektowanego specjalnie do tej turbiny. Dzięki temu eliminuje się straty występujące w przekładni podwyższającej prędkość obrotową, zmniejsza się cenę elektrowni i poprawia jej niezawodność. W artykule omówiono konstrukcję i parametry generatora oraz podano przykładowy rozkład pola magnetycznego w jego obwodzie magnetycznym. Do oddawania energii do sieci energetycznej niskiego napięcia wykorzystano seryjny falownik pracujący z algorytmem MPPT.

## 2. Konstrukcja turbiny

Jak wspomniano wcześniej, zastosowana turbina wiatrowa wyposażona jest w pięć łopat o zmiennym przekroju i zmiennym kącie natarcia. Zmiany te są uzależnione od średnicy turbiny. Największy przekrój i największy kąt natarcia występuje u nasady łopaty. Łopaty turbiny wykonane są z laminatu poliestrowo-szklanego. W celu ochrony przed niszczącym laminat promieniowaniem ultrafioletowym turbinę pomalowano białym lakierem ochronnym. Końce łopat ze względów bezpieczeństwa pomalowane są na czerwono. Turbinę z generatorem, kierunkowym sterem naprowadzającym elektrownię „na wiatr” i obrotnicą umieszczono na wysokości 2 m. Całą konstrukcję elektrowni przymocowano do płaskiego dachu czteropiętrowego budynku. Na rysunku nr 1 pokazano konstrukcję wykonanej elektrowni.

Przedstawiona elektrownia ma turbinę pięciołopatową o średnicy 2,5 m i osiąga moc 2,4 kW przy wietrze o prędkości 12 m/s. Do ustawiania turbiny na wiatr służy ster kierunkowy o powierzchni 0,2 m<sup>2</sup> umieszczony w odległości 1,8 m od osi obrotu. Na rysunku, przy sterze kierunkowym, widoczny jest

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono konstrukcję i parametry małej elektrowni wiatrowej wyposażonej w wielołopatowy wirnik o poziomej osi obrotu. Pomimo większego kosztu w porównaniu z tradycyjnymi trójłopatowymi turbinami zdecydowano się na turbinę pięciołopatową, gdyż przy wiatrach o niewielkiej prędkości (a takie występują w większości) uzyskuje się z niej znacznie więcej energii. Turbina wiatrowa umieszczona jest bezpośrednio na wale trójfazowego generatora z magnesami trwałymi, którego obwód magnetyczny pokazano na rysunku ilustrującym rozkład pola magnetycznego. Generator zasila jednofazowy falownik podłączony bezpośrednio do sieci niskiego napięcia. Falownik umożliwia przekazywanie energii do sieci w szerokim zakresie napięcia uzyskiwanego z generatora, czyli w szerokim zakresie prędkości obrotowych turbiny wiatrowej. W artykule podano łączną ilość energii przekazanej do sieci w miesiącach: wrzesień, październik i listopad 2015 roku oraz moc szczytową elektrowni uzyskaną przy wietrze o prędkości 12 m/s. Energia uzyskiwana z tej elektrowni może być oddawana do sieci lub może być wykorzystana jako dodatkowe źródło energii w układach centralnego ogrzewania.

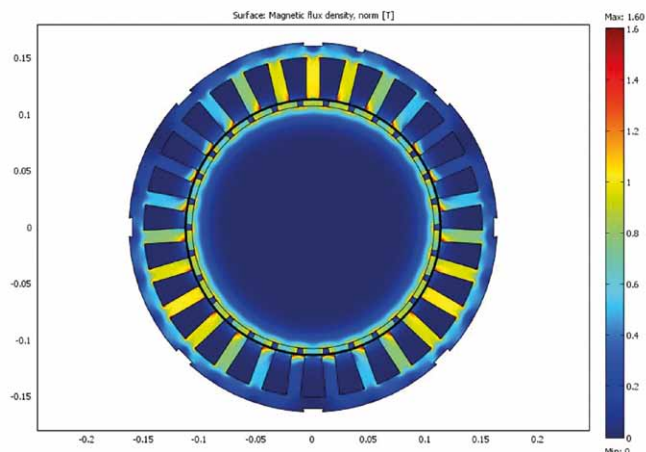
Słowa kluczowe: elektrownia wiatrowa, generator

**Abstract:** The paper presents the construction and parameters for small wind power plant fitted with multi-blade rotor with horizontal axis. Despite higher cost in comparison with traditional three blades turbine, the five blades turbine has been chosen. It results from the fact that this multi-blade turbine provides much more energy for the wind blowing with low strength (this wind prevails). The wind turbine is directly installed on the shaft of three-phase generator with permanent magnet whose magnetic circuit is presented in the figure illustrating magnetic field distribution. The generator supplies the converter directly connected to low voltage net. The converter allows transmitting the energy to the net in large range of voltage generated by the turbine. The paper presents cumulative energy transmitted to the net in September, October and November in 2015 and peak power of wind power plant generated at the wind blowing with the speed of 12 m/s. The energy generated by this power plant can be transmitted to the net or used as backup system.

Keywords: wind power plant, generator



Rys. 1. Widok małej elektrowni wiatrowej



Rys. 2. Rozkład strumienia magnetycznego

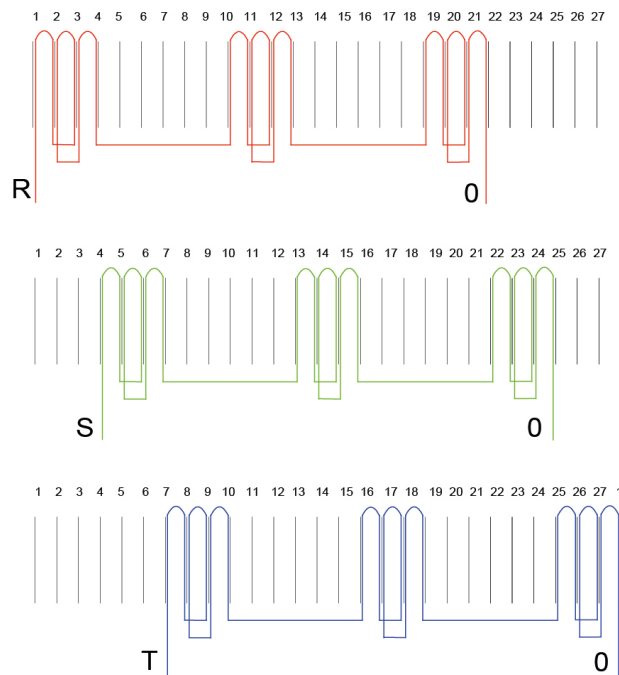
siłownik elektryczny zmieniający kąt położenia steru kierunkowego w przypadku wiatru o prędkości przekraczającej 15 m/s.

### 3. Konstrukcja generatora

Przy projektowaniu generatora przyjęto następujące podstawowe założenia:

- moc: 2,5 kW;
- napięcie wyjściowe:  $3 \times 170$  V;
- częstotliwość: 50 Hz;
- prędkość obrotowa: 250 obr./min.

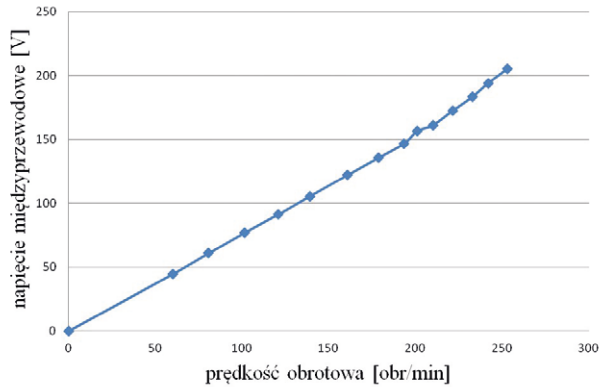
Do budowy generatora wykorzystano blachy stojana generatora o mocy 3 kW [4, 5]. W generatorze tym zastosowano, sprawdzony w poprzednich konstrukcjach [7, 8], sposób minimalizacji momentu zaczepowego [6]. Stojan maszyny ma 27 prostych zębów, na których umieszczono trójfazowe uzwojenie. Proste zęby stojana ułatwiają i przyspieszają proces uzwojenia – cewki uzwojenia można w takim przypadku formować na zewnętrznych wzornikach i zakładać na zęby stojana. Na wirniku umieszczono przemienniebiegunowo 24 segmentowe magnesy z materiału N38 SH o szerokości 20 mm i wysokości 5 mm. Magnesy umieszczone są w niewielkich (1 mm) zagłębieniach. Taka forma umieszczenia magnesów eliminuje przyrządy stosowane do klejenia magnesów i zabezpiecza magnesy przed odklejeniem na skutek działania dużych sił styčných występujących przy pracy generatora. Szerokość magnesu w 76 procentach wypełnia podziałkę biegunową, co – jak obliczono – zapewnia w przedstawionej konstrukcji minimum momentu zaczepowego. W celu zmniejszenia masy generatora jego wirnik wykonano w postaci rury o ściance grubości 10 mm. Obliczenia projektowe modelu płaskiego wykonano przy użyciu programu FEMM w ostatnio zmodyfikowanej wersji 4.2. Na rys. 2 pokazano przykładowy rozkład pola magnetycznego w opracowanym generatorze, a na rys. 3 schemat uzwojenia stojana.



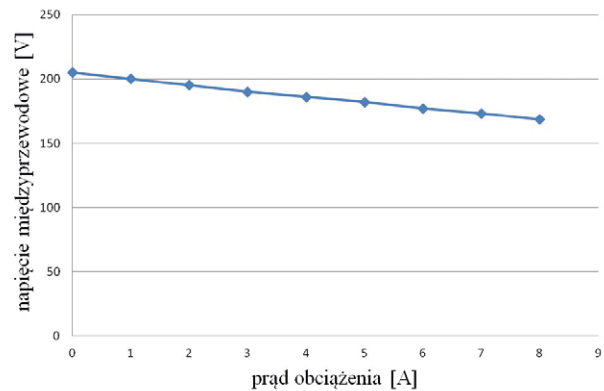
Rys. 3. Schemat uzwojenia generatora

### 4. Wyniki badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne generatora obejmowały pomiary: momentu zaczepowego, napięcia biegu jałowego w funkcji prędkości obrotowej oraz napięcia wyjściowego w funkcji prądu obciążenia przy prędkości znamionowej. Badany generator napędzany był przez przekładnię zębatą asynchronicznym silnikiem klatkowym zasilanym z falownika. Wartość maksymalną momentu zaczepowego zmierzono przy pomocy zrównoważonej dźwigni i precyzyjnych odważników. Dokonano 10 pomiarów w różnych położeniach wirnika i wyznaczono średnią arytmetyczną. Jak wspomniano wcześniej, średnia



Rys. 4. Zależność napięcia wyjściowego od prędkości obrotowej

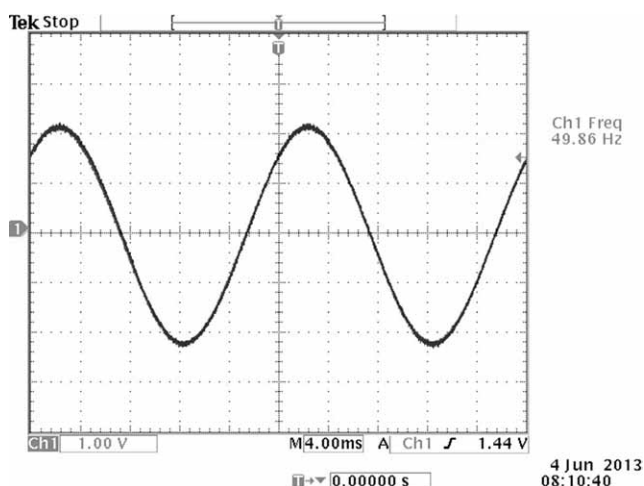


Rys. 5. Zależność napięcia wyjściowego od prądu obciążenia

wartość momentu zaczepowego jest jak na maszynę wielobiegunową niewielka i wynosi 1,8 Nm, co stanowi 1,9% momentu znamionowego. Zasilanie silnika napędowego przez falownik umożliwiło regulację prędkości obrotowej i wyznaczenie charakterystyki biegu jałowego generatora.

Jest to przebieg typowy dla generatorów z magnesami trwałymi – napięcie wyjściowe zależy liniowo od prędkości

obrotowej. Drugą badaną zależnością była charakterystyka obciążenia, najlepiej obrazująca właściwości energetyczne generatora. Podczas jej wyznaczania badany generator obciążony był rezystancyjnie i symetrycznie w każdej fazie. Podczas tej próby ustalono prędkość obrotową równą 250 obr./min. i stopniowo obciążano generator. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 5, a na rys. 6 pokazano kształt napięcia wyjściowego.



Rys. 6. Kształt napięcia fazowego

Z charakterystyki obciążenia widać, że generator ma jeszcze rezerwę mocy (brak typowego zakrzywienia w końcowej części przebiegu). Z rysunku nr 6 wynika, że napięcie wyjściowe generatora nie odbiega od sinusoidy, co potwierdziła przeprowadzona analiza FFT.

## 5. Zabezpieczenie burzowe elektrowni

W małych turbinach wiatrowych poziomej osi obrotu, ze względu na wysoki koszt, nie stosuje się mechanizmów zmieniających kąt natarcia łopatek turbin. Przy wiatrach przekraczających prędkość 15 m/s turbiny te mogą osiągać wysokie prędkości obrotowe. Wówczas występują duże siły odśrodkowe, zagrażające bezpieczeństwu ich konstrukcji i bezpieczeństwu osób znajdujących się w niewielkiej odległości od turbiny. Z tego względu konieczne staje się stosowanie innych środków ochrony [4, 8]. W opracowanej elektrowni zastosowano dwa rodzaje zabezpieczeń. Pierwszym z nich jest zmiana położenia steru kierunkowego elektrowni. Realizowana jest ona przez widoczny na rysunku nr 1 siłownik elektryczny, wychylający ster kierunkowy przy wietrze powyżej 15 m/s. Wówczas turbina wiatrowa ustawia się bokiem do kierunku wiatru, co powoduje jej zatrzymanie. Drugim zabezpieczeniem jest układ zwierania uzwojeń generatora przez rezystory o niewielkiej wartości. Następuje wówczas silne hamowanie i szybkie wytracenie prędkości obrotowej turbiny. Zwieranie uzwojeń generatora bez rezystorów nie jest zalecane z uwagi na bardzo szybkie hamowanie, przy którym możliwe jest uszkodzenie łopatek turbin (łopaty mają duży moment bezwładności i natychmiastowe zatrzymanie grozi złamaniem łopatek turbin u nasady).

## 6. Wnioski

Przedstawiona w pracy mała elektrownia wiatrowa może mieć zastosowanie np. do wspomagania układu centralnego ogrzewania w domu jednorodzinny lub – dzięki nowej ustawie o odnawialnych źródłach energii – można uzyskaną energię oddawać do sieci elektroenergetycznej. Podczas badań terenowych w okresie od początku września do 15 listopada 2015 roku elektrownia oddała do sieci 139 kWh energii, a maksymalna

zarejestrowana moc wynosiła 2,4 kW. Nietypowe napięcie wyjściowe generatora wynika z dopuszczalnego napięcia wejściowego zastosowanego falownika. Autor opracowania od kilku lat testuje w tym samym miejscu różne typy elektrowni o poziomych i pionowych osiach obrotu. Dotychczas testowane były trzy elektrownie z turbinami o pionowej osi obrotu i dwie elektrownie z osią poziomą. Z elektrowni VAWT uzyskiwano od 100 do 130 W/m<sup>2</sup>, zaś z elektrowni HAWT od 150 do 200 W/m<sup>2</sup> przy wietrze o prędkości 12 m/s. Prezentowane rozwiązanie jest najlepsze z dotychczas badanych pod względem ilości energii uzyskiwanej z określonej powierzchni turbiny, gdyż przy wietrze o prędkości 12 m/s uzyskano 500 W/m<sup>2</sup> powierzchni wystawianej na wiatr. Brak akumulatorów gromadzących energię i oddawanie całej energii wytworzonej do sieci skraca okres zwrotu nakładów inwestycyjnych. Wiarygodne dane można uzyskać przy rocznym testowaniu małej elektrowni i wydaje się, że jedynie roczna produkcja energii z m<sup>2</sup> turbiny posiadanej w tym samym miejscu pokazuje, która elektrownia jest obiektywnie najbardziej wydajna.

## Literatura

- [1] BOCZAR T.: *Energetyka wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania*. Wydawnictwo SIMP 2008.
- [2] CZUCZMAN J., CZEREPANJAK M., SCZUR I., GOLUBOWSKI P.: *Generatory synchroniczne do autonomicznych, bezprzekładniowych elektrowni wiatrowych*. XII Konferencja „Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych”, Ustroń, 18–20.05.2005.
- [3] GLINKA T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [4] GORYCA Z.: *Elektrownia wiatrowa o pionowej osi obrotu i mocy 3 kW*. „Wiadomości Elektrotechniczne” 11/2014.
- [5] GORYCA Z.: *Wolnoobrotowa prądnica o mocy 3 kW do elektrowni wiatrowej lub wodnej*. Konferencja „Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych”, Ryto, 28–30.05.2014, „Zeszyty Problemowe, Maszyny Elektryczne” nr 101.
- [6] GORYCA Z., MALINOWSKI M., PAKOSZ A.: *Wielobiegunowa maszyna z magnesami trwałymi o zredukowanym momencie zaczepowym*, Patent nr 218930.
- [7] 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.
- [8] GORYCA Z., ZIÓŁEK M.: *Elektrownia wiatrowa VAWT o mocy 1 kW z systemem zdalnego sterowania*. „Wiadomości Elektrotechniczne” 1/2014.
- [9] POLAK A., BEŻAŃSKI A.: *Małe elektrownie wiatrowe – przykłady praktycznego zastosowania*. XII Konferencja „Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych”, Ustroń, 18–20.05.2005.
- [10] ROSSA R., BIAŁAS A.: *Prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi do przydomowych elektrowni wiatrowych*, XX Konferencja „Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych”, Ryto, 25–27.05.2011.

dr hab. inż. Zbigniew Goryca – Politechnika Świętokrzyska

artykuł recenzowany