

Tadeusz RODACKI  
Wojciech WYLĘŻEK  
Andrzej LATKO

## ELEKTROWNIE WIATROWE

**Streszczenie.** W artykule poruszono kilka problemów związanych z budową elektrowni wiatrowych o mocach powyżej 100 kW. Zawiera on ogólne omówienie różnych rodzajów silników wiatrowych i możliwości ich wykorzystania w elektrowniach wiatrowych. Zaprezentowano także układy pracy tego typu elektrowni przeznaczonych do współpracy z siecią elektroenergetyczną. Przedstawiono również wymagania stawiane systemowi sterowania i nadzoru.

## WIND TURBINE POWER GENERATORS

**Summary.** Several aspects of implementing wind turbine power generators with power above 100 kW are presented in the paper. Different types of wind motors, their capacity for converting wind energy and their potential implementation in wind power systems. Are described in general as well. The article also contains description of the power system in a wind power station connected to the grid. Furthermore, there are given tasks for the control system in such a small scale power station.

### 1. WPROWADZENIE

Od bardzo dawna ludzie starali się spożytkować energię wiatru budując wiatraki służące różnym celom np. do nawadniania pól uprawnych albo do mielenia zboża. Do niedawna wykorzystanie energii wiatru w celu wytwarzania energii elektrycznej nie było stosowane głównie ze względów ekonomicznych. Obecnie, kiedy ceny energii elektrycznej wytwarzanej w konwencjonalny sposób ciągle rosną przez wzrost kosztów paliw, a także przez wzrost kar za zanieczyszczenie środowiska, wzrasta zainteresowanie niekonwencjonalnymi, ekologicznie czystymi źródłami energii, dotąd nie eksploatowanymi. Jednym z takich źródeł jest energia wiatru. Wraz ze wzrostem liczby budowanych elektrowni wiatrowych stają się one tańsze z uwagi na ich standaryzację. Nie są to już jednostkowe prototypy, lecz urządzenia seryjne. Przez to produkcja energii elektrycznej tym sposobem staje się tańsza.

Należy jednak zauważyć, że elektrownie wiatrowe uważane za ekologicznie czyste oddziałują również w pewnym stopniu niekorzystnie na środowisko przez uciążliwy hałas, emitowany podczas pracy oraz nie zawsze pozytywny wpływ na krajobraz, zwłaszcza w przypadku budowy farm wiatrowych zajmujących duże przestrzenie.

W Polsce można zaobserwować wzrost zainteresowania stosowaniem tego typu rozwiązań. Według danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej terytorium Polski posiada potencjał wiatru uzasadniający podjęcie prac związanych z projektowaniem, budową i eksploatacją elektrowni wiatrowych.

## 2. SILNIKI WIATROWE

Podstawowym kryterium podziału silników wiatrowych jest podział ze względu na położenie osi wirnika w stosunku do kierunku wiatru:

- silniki o osi obrotu usytuowanej poprzecznie do kierunku wiatru, tj. wykorzystujące głównie czołowe parcie wiatru (silniki bębnowe A, karuzelowe B, rotorowe C), (rys.1),
- silniki o osi obrotu usytuowanej równolegle do kierunku wiatru, tj. wykorzystujące oddziaływanie boczne wiatru (wiatraki A, silniki wielołopatkowe (wolnobieżne) B, śmigłowe (szybkobieżne) C), (rys.2).

Według innego podziału ze względu na szybkobieżność  $Z$  definiowaną w postaci [5]:

$$Z = \frac{R_{\max} \omega}{V}, \quad (1)$$

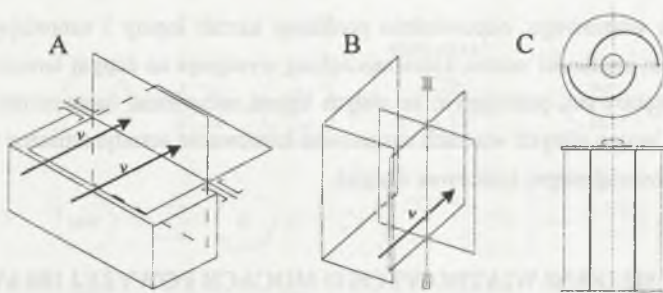
gdzie:  $\omega$  – prędkość kątowna wirnika,  $R_{\max}$  – promień śmigła,  $v$  – prędkość wiatru, silniki wiatrowe można sklasyfikować następująco:

- wolnobieżne o  $Z < 1,5$  (są to silniki o czołowym oddziaływaniu wiatru  $Z \sim 0,5$ ),
- średnobieżne o  $1,5 < Z < 3,5$  (wiatraki  $Z \sim 1.7$ , silniki wielołopatkowe  $Z \sim 1 \div 1,2$ ),
- szybkobieżne o  $Z$  większym od 3,5 (silniki śmigłowe  $Z \sim 10 \div 20$ ).

Chociaż silniki należące do pierwszej grupy, według podziału ze względu na położenie osi obrotu wirnika, mają pewne zalety, do których należą np. prostota wykonania i brak potrzeby nastawiania na kierunek wiatru, to jednak, ponieważ charakteryzują się bardzo niską sprawnością, rzadko stosuje się je w praktyce. Przydatność silnika wiatrowego do przetwarzania energii wiatru jest określana przede wszystkim przez aerodynamiczny współczynnik wykorzystania energii wiatru  $c_1$  definiowany jako [5]:

$$c_1 = \xi_t \eta_a, \quad (2)$$

gdzie:  $\xi_t$  – współczynnik teoretycznego wykorzystania mocy wiatru (określany jako stosunek mocy wiatru oddawanej bez strat urządzeniu wiatrowemu do całkowitej mocy wiatru),  $\eta_a$  – współczynnik sprawności aerodynamicznej uwzględniający straty aerodynamiczne w silniku wiatrowym.

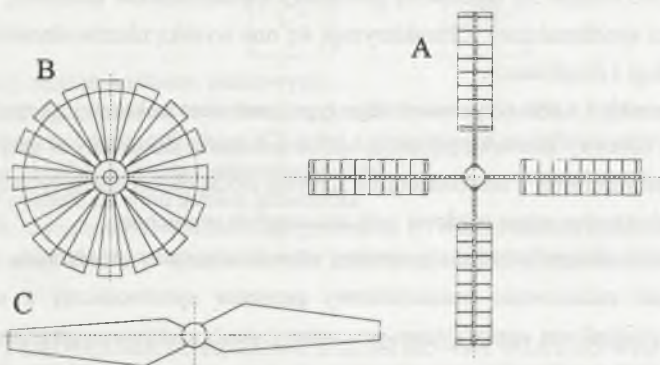


Rys.1. Silniki o osi obrotu poprzecznej względem kierunku wiatru:

A) silnik bębnowy, B) karuzelowy, C) rotorowy

Fig.1. Wind motors with rotor axis perpendicular to the wind stream:

A) cross wind type, B) paddlewheel type, C) split Savonius type



Rys.2. Silniki o osi obrotu równoległej względem kierunku wiatru:

A) wiatrak, B) silnik wielołopatkowy (wolnobieżny), C) silnik śmigłowy (szybkobieżny)

Fig.2. Wind motors with rotor axis parallel to the wind stream:

A) wind mill type, B) multi-bladed type (slow running), C) double bladed type (blade type) (fast running)

W przypadku silników o poprzecznej do kierunku wiatru osi obrotu współczynnik ten wynosi średnio 0,18 dla silnika rotacyjnego, a dla pozostałych silników z tej grupy znacznie mniej. Silniki o osi obrotu równoległej do kierunku wiatru są znacznie pod tym względem lepsze. Cechują się współczynnikiem wykorzystania energii na poziomie 0,4. Z tego względu są one najczęściej stosowane w elektrowniach wiatrowych.

W śmigłowych silnikach wiatrowych ilość energii odzyskiwanej z wiatru zależy od kąta ustawienia śmigła względem wiatru. Najlepiej, aby kąt ten zawsze był optymalny. Zmienia się on zarówno z prędkością wiatru, jak i wirnika silnika wiatrowego. Problem z utrzymaniem optymalnego kąta rozwiązuje się albo stosując silniki śmigłowe ze sterowanym kątem ustawienia łopatek względem kierunku wiatru, albo korzystając z aerodynamicznego efektu przeciągania, czyli utraty siły nośnej przez śmigło przy przekroczeniu granicznej prędkości obrotowej

wirnika silnika wiatrowego, odpowiednio profilując kształt łopaty i ustawiając pod kątem odpowiadającym prędkości wiatru, która najczęściej występuje na danym terenie. Dodatkowo przy silniku wiatrowym, pracującym ze stałym kątem ustawienia, łopat można dla bezpieczeństwa przy bardzo silnych wiatrach zastosować hamowanie aerodynamiczne przez skręcanie o dziewięćdziesiąt stopni końcówek śmigieł.

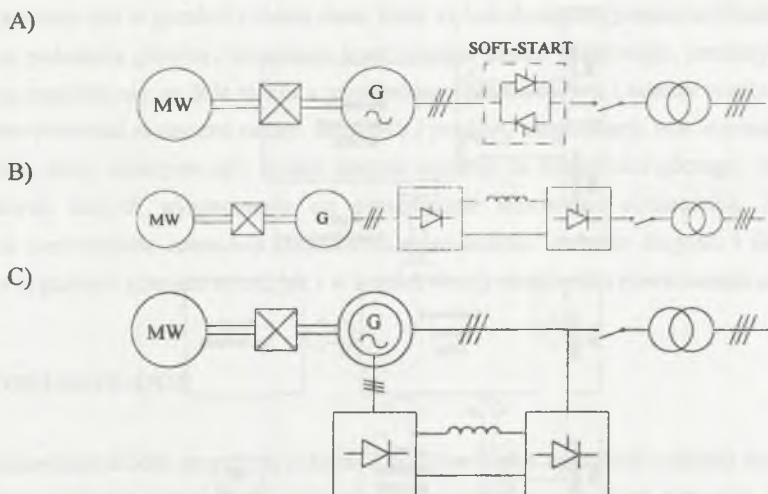
### **3. SYSTEMY SIŁOWNI WIATROWYCH O MOCACH POWYŻEJ 100 kW, WSPÓLPRACUJĄCYCH Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ**

Podstawowe konfiguracje układów zasilania elektrowni wiatrowych przedstawiono na rys.3. W praktyce stosuje się najczęściej generatory asynchroniczne klatkowe, pracujące powyżej prędkości synchronicznej. Charakteryzują się one wysoką niezawodnością oraz niskim kosztem produkcji i eksploatacji.

Przykładowy układ z wykorzystaniem tego typu generatora pokazano na rys.3A. Przedstawiony schemat blokowy zawiera opcjonalny układ soft-startu stosowany w przypadku współpracy elektrowni wiatrowej z niedostatecznie sztywną siecią elektroenergetyczną, mający wyeliminować niekorzystne udary prądowe podczas częstych rozruchów.

Alternatywne rozwiązanie układu generatora siłowni wiatrowej przedstawia rys.3B [4]. W tym rozwiązaniu zastosowano bezszczotkowy generator synchroniczny z energoelektronicznym przekształtnikiem sprzęgającym generator z siecią elektroenergetyczną. Jest to niewątpliwie przykład rozwiązania nowoczesnego, ale z uwagi na swoją niestandardowość jest ono kosztowne, a ze względu na zastosowanie układów przekształtnikowych generuje ono do sieci wyższe harmoniczne, a ponadto z uwagi na rozbudowaną strukturę układu może być bardziej zawodny.

Innym przykładem rozwiązania współpracy siłowni wiatrowej z siecią jest przedstawiony na rys. 3C układ kaskady podsynchronicznej [2]. W tym przypadku występują podobne problemy jak we wcześniej omawianym układzie, tj. wyższe koszty (silnik pierścieniowy jest droższy i dochodzi jeszcze układ przekształtnikowy ze sterowaniem). Ze względu na dużą liczbę urządzeń jest on mniej niezawodny w porównaniu z prostym rozwiązaniem omawianym na początku (rys 3A). Niemniej podstawową zaletą układu jest możliwość kształtowania charakterystyki mechanicznej generatora asynchronicznego, dopasowując ją do charakterystyki silnika wiatrowego. W rozwiązaniu tym nie ma potrzeby stosowania silnika wiatrowego z ustawianym kątem łopat.



Rys.3. Systemy zasilania siłowni wiatrowych:

A) układ z generatorem asynchronicznym klatkowym, B) układ z generatorem synchronicznym bezszczotkowym, C) układ z generatorem asynchronicznym pierścieniowym w układzie kaskady podsynchronicznej

Fig.3. Power systems of wind turbine generators:

A) with asynchronous squirrel cage generator, B) with brushless synchronous generator C) with asynchronous wound-rotor generator in subsynchronous cascade circuit

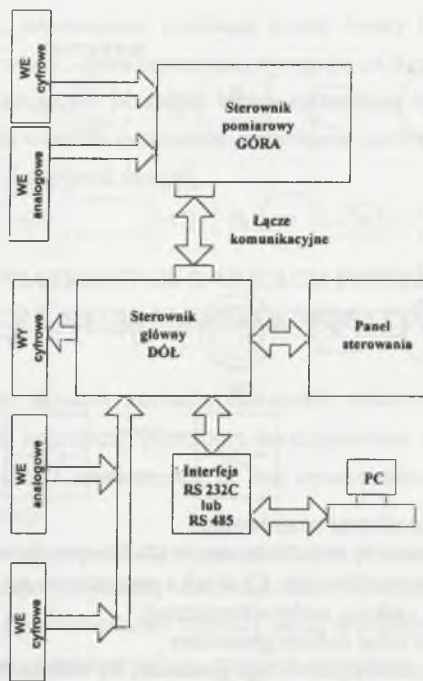
#### 4. UKŁAD STEROWANIA I NADZORU ELEKTROWNI WIATROWEJ

W punkcie tym opisano układ sterowania i nadzoru dla elektrowni wiatrowej z silnikiem wiatrowym o nastawialnym kącie łopatek z generatorem asynchronicznym klatkowym.

Układ sterowania i regulacji elektrowni wiatrowej powinien realizować następujące zadania:

- blok sterowania i regulacji:

- system sterowania musi identyfikować na podstawie prędkości wiatru stan, kiedy elektrownia może być załączona oraz kiedy musi zostać wyłączona; realizuje odpowiednie procedury rozruchu, zatrzymania lub czuwania,
- układ regulacji kąta natarcia łopatek wirnika i położenia głowicy względem kierunku wiatru; powinien zapewniać możliwie optymalną pracę obiektu,



Rys.4. Schemat blokowy układu sterowania elektrowni wiatrowej  
 Fig.4. Block diagram of the wind turbine control circuit

- system blokad:

- system diagnostyczny kontrolujący przykładowo poziom i temperaturę oleju w przekładniach, temperaturę uzwojeń generatora, stan zużycia hamulców, poziom napięcia sieci i kolejność faz; działa na zasadzie blokady załączenia lub awaryjnego zatrzymania w przypadku wystąpienia niezgodności w sprawdzanych parametrach,
- dodatkowe, niezależne od centralnego układu sterowania czujniki, np. czujnik przekroczenia dopuszczalnych drgań konstrukcji nośnej, czujnik przekroczenia krytycznych obrotów generatora; powodują awaryjne wyłączenie działające w razie niepoprawnej pracy układu głównego, dublując w krytycznych sytuacjach pewne funkcje układu centralnego,

- komputerowy system monitorowania:

- ma on za zadanie rejestrację i wizualizację wybranych wielkości związanych z pracą elektrowni, między innymi takich jak **parametry elektryczne**: moc czynna, moc bierna,  $\text{tg}\phi$ , energia elektryczna, poziom napięcia generatora, **parametry związane z wiatrem**: szybkość i kierunek wiatru.

Układ sterowania i nadzoru powinien zapewniać bezobsługową pracę elektrowni z możliwością ręcznej ingerencji podczas pracy systemu w trybie automatycznym.

Jeden ze sposobów rozwiązania sterowania elektrowni wiatrowej pokazano na rys. 4. Proponowany układ sterowania składa się z dwóch sterowników mikroprocesorowych. Jeden

umieszczony jest w gondoli i zbiera dane, które są tam dostępne (pomiar szybkości i kierunku wiatru, położenia głowicy, ustawienia łopat wirnika silnika wiatrowego, pomiary temperatur), a drugi znajduje się na dole razem z urządzeniami łączeniowymi i mierzy wielkości dostępne na dole (wartości skuteczne napięć fazowych i prądów, temperatury, moc czynną i bierną generatora, stany zabezpieczeń). Resztę danych uzyskuje ze sterownika górnego. Na podstawie zebranych danych wypracowuje on odpowiednie sterowanie elektrownią. Zastosowanie dwóch sterowników uzasadnia konieczność ograniczenia zarówno długości i ilości przewodów z sygnałami pomiarowymi, jak i w konsekwencji możliwości powstawania zakłóceń.

## 5. PODSUMOWANIE

Odnawialne źródła energii są jednym z podstawowych sposobów ochrony środowiska naturalnego poprzez ograniczenie emitowanych zanieczyszczeń. Duży potencjał energetyczny wiatru gwarantuje dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej.

Najwyższą sprawnością charakteryzują się silniki śmigłowe szybkoobrotowe o osi obrotu wirnika równoległej do kierunku wiatru, dlatego znajdują najszersze zastosowanie w budowanych elektrowniach, szczególnie dla mocy powyżej 100 kW.

Z punktu widzenia niezawodności oraz możliwie bezobsługowej pracy w praktyce mają zastosowanie przede wszystkim generatory indukcyjne klatkowe. Dodatkową zaletą przemawiającą na ich korzyść są niskie koszty produkcji i eksploatacji.

Układ sterowania na podstawie wielkości wejściowych analogowych i cyfrowych wypracowuje na podstawie skomplikowanych zależności odpowiednie sygnały dla elementów wykonawczych. Z analizy zadań układu sterowania wynika konieczność jego realizacji z zastosowaniem techniki mikroprocesorowej.

Aktualny stan rozwoju energetyki wiatrowej w krajach wysoko rozwiniętych znacznie przewyższa poziom Polski. Wynika stąd potrzeba popularyzacji tych zagadnień i rozwoju konstrukcji z uwzględnieniem warunków panujących w naszym kraju.

## LITERATURA

1. Konieczny S.: Doświadczenia z budowy i eksploatacji elektrowni wiatrowej typu DAN-mark-20 w Swarzewie. Wiadomości Elektrotechniczne nr 7/1993, s. 255-259.
2. Niechaj M.: Współpraca w stanach dynamicznych silnika wiatrowego i generatora pierścieniowego w układzie kaskady ze sprzężeniem prądowym. Wiadomości Elektrotechniczne nr 8/1994, s. 300-303.
3. Pieńkowski R.: Opracowanie analityczno-syntetyczne: Elektrownie wiatrowe stan aktualny i tendencje rozwojowe. Instytut Elektrotechniki, Warszawa 1991.
4. Termmel G.: 6-MW wind power plant on the Golan Heights. ABB Review 6/7 1994.

5. Jagodziński W.: Silniki wiatrowe. PWN, Warszawa 1959.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Skoczkowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 lipca 1997 r.

### Abstract

Several aspects of implementing wind turbine power generators with power above 100 kW are presented at the beginning of the paper. Then different types of wind motors divided into groups considering location of the rotor axis to the wind stream, (Figs. 1 and 2) and coefficient of rotation defined by equation (1) are described in general. Capacity of the both types of wind motors (with rotor axis perpendicular to the wind stream and with rotor axis parallel to the wind stream) for converting wind energy and their potential implementation in wind power systems are analysed. In the next paragraph there are schematic diagrams of power systems in wind turbine generators. In fig. 3 are shown systems: with asynchronous squirrel cage generator, with brushless synchronous generator and with asynchronous wound-rotor generator in subsynchronous cascade circuit. Their features are described taking into account operation, control and reliability. Afterwards there are presented tasks for the control, supervising and monitoring systems in a wind turbine power station. Proposed solution of the wind turbine power generator control system consists of two linked together microprocessor based controllers with ability to communicate with monitoring computer.