

Tadeusz RODACKI  
Wojciech WYLĘŻEK  
Andrzej LATKO

## SYSTEM STEROWANIA ELEKTROWNI WIATROWEJ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono realizację systemu sterowania elektrowni wiatrowej o mocy znamionowej 160 kW. Na elektrownię składa się trójłopatowa turbina wiatrowa ze sterowanym kątem ustawienia łopat, przekładnia mechaniczna i asynchroniczny generator pracujący bezpośrednio na sieć elektroenergetyczną. System sterowania wykonano w postaci dwóch połączonych ze sobą sterowników mikroprocesorowych. Zapewnia on w pełni automatyczną, bezobsługową pracę obiektu.

## CONTROL SYSTEM OF WIND TURBINE POWER GENERATOR

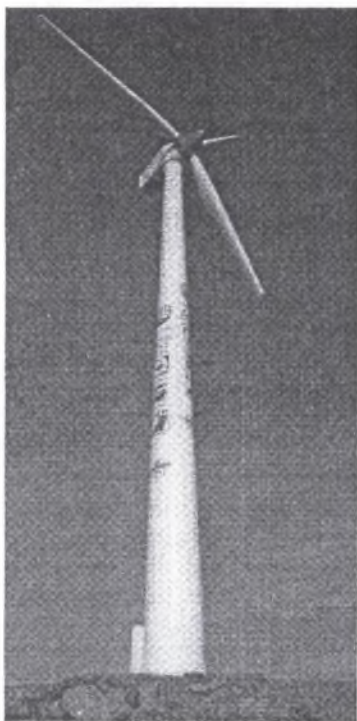
**Summary.** In the paper realisation of a control system of the wind turbine power generator with rated power of 160 kW is presented. The wind turbine power generator consists of three blades pitch controlled wind turbine, mechanical drive and induction squirrel cage generator connected straight to the utility grid. Control system was constructed with two interlinked microprocessor based controllers. It allows fully automatic, maintenanceless operation of the object.

### 1. WPROWADZENIE

System sterowania elektrowni wiatrowej powstał w wyniku współpracy zakładu produkującego elektrownie wiatrowe NOWOMAG S.A. a Zakładem Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki Politechniki Śląskiej. Działania te doprowadziły do zaprojektowania i wykonania systemu sterowania opartego na dwóch sterownikach mikroprocesorowych zbudowanych na bazie mikrokontrolera jednocukładowego firmy INTEL 80C196KC. Wybór techniki mikroprocesorowej do realizacji tego celu wydaje się oczywisty. Główne przesłanki przemawiające za wybraniem takiego rozwiązania były następujące:

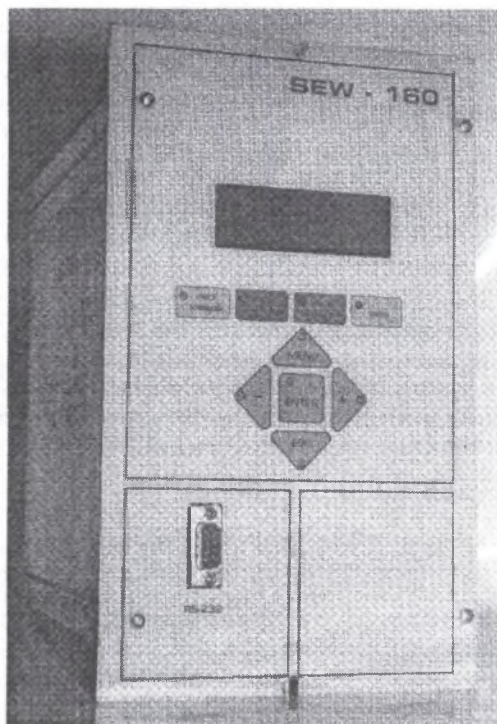
- złożone algorytmy sterujące,
- duża ilość sygnałów pomiarowych,
- znaczna liczba sterowanych elementów wykonawczych,
- diagnostyka stanów awaryjnych,
- zapamiętywanie historii zdarzeń,
- bezobsługowa praca obiektu,
- możliwość zdalnego monitorowania,
- wielopoziomowy interfejs do komunikacji z użytkownikiem
- zwarta konstrukcja.

## 2. OBIEKT STEROWANIA – ELEKTROWNIA WIATROWA



Rys.1. Elektrownia wiatrowa w miejscowości Słup

Fig.1. Wind turbine generator in Słup



Rys.2. Sterownik główny elektrowni wiatrowej

Fig.2. Main controller of the wind turbine generator

Obiektem sterowania jest siłownia wiatrowa z trójłopatowym silnikiem wiatrowym o nastawianym kącie łopaty (rys.1). Wieża elektrowni jest wykonana w postaci stalowej rury stożkowej o wysokości 30 m, średnica podstawy wynosi 2.3 m, a średnica górna 1 m. Średnica wirnika silnika wiatrowego wynosi 22 m, a powierzchnia wirnika wynosi 380 m<sup>2</sup>. Łopaty wiatraka wykonane są z materiału kompozytowego. Kąt położenia łopaty zmienia się za pomocą układu elektromechanicznego sterowanego elektrycznie, napędzanego z wału silnika wiatrowego. Silnik wiatrowy sprzęgnięty za pośrednictwem przekładni zębataj z trójfazowym generatorem asynchronicznym o mocy znamionowej 160 kW, pracującym na sieć elektroenergetyczną. Na wale generatora zabudowano hamulec tarczowy. Układ generatora umieszczono w gondoli elektrowni, wyposażonej w serwonapędy pozwalające na śledzenie kierunku wiatru. W gondoli rozmieszczono przetworniki pomiarowe następujących wielkości fizycznych: prędkość i kierunek wiatru, prędkość obrotowa turbiny wiatrowej i generatora, kąt ustawienia łopaty, kąt położenia głowicy, temperatur (generatora, przekładni i gondoli). Dodatkowe zabezpieczenie stanowią czujniki stanów awaryjnych: przekroczenia dopuszczalnej prędkości obrotowej generatora i wibracji konstrukcji, braku oleju w przekładni głównej, nadmiernego skręcenia kabla energetycznego.

U podnóża wieży zainstalowano szafę sterowniczą zawierającą aparaturę łączeniową, przekładniki prądowe oraz przetworniki pomiarowe: mocy czynnej i biernej generatora, temperatury otoczenia.

### 3. SYSTEM STEROWANIA I NADZORU

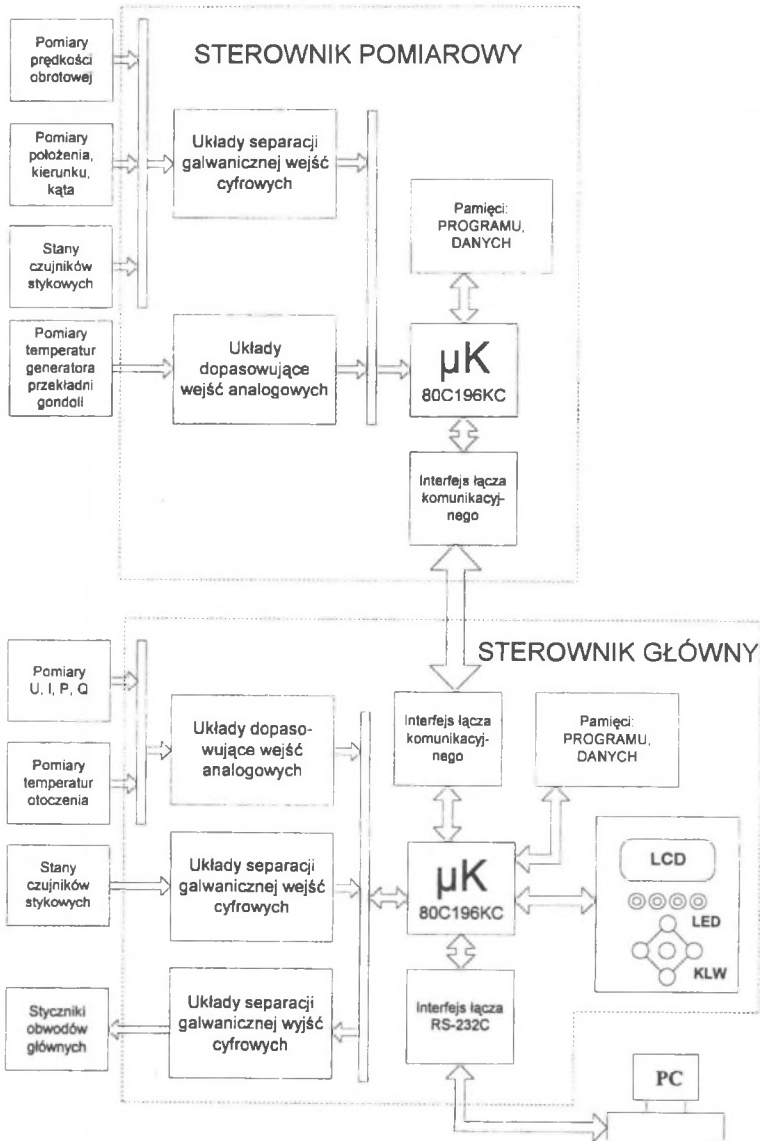
W przypadku zastosowania silnika wiatrowego śmigłowego ze zmiennym kątem ustawienia łopatek sterowanie wydawaną mocą czynną elektrowni wiatrowej leży po stronie turbiny wiatrowej. Polega na kształtowaniu optymalnego kąta ustawienia łopatek w zależności od prędkości wiatru i prędkości obrotowej wirnika dla danego profilu łopatek. Z uwagi na mały zakres zmienności prędkości obrotowej wirnika w stanie pracy kąt ustawienia łopatek można uzależnić tylko od prędkości wiatru.

#### 3.1. Konstrukcja systemu sterowania

System sterowania elektrowni wiatrowej przedstawia rys.3. Składa się z dwóch sterowników mikroprocesorowych: głównego (rys.2) i pomiarowego. Sterownik pomiarowy umieszczony w gondoli przetwarza dane pomiarowe charakteryzujące pracę silnika wiatrowego (prędkość obrotowa, kąt położenia łopatek wirnika, położenie gondoli), przekładni mechanicznej (temperatura oleju), generatora (prędkość obrotowa, temperatura) oraz analizuje parametry wiatru (prędkość i kierunek). Sterownik główny zainstalowano w szafie sterowniczej u podstawy elektrowni. Mierzy on parametry związane z siecią elektroenergetyczną (wartości skuteczne napięcia i prądu oraz moc czynną i bierną generatora, wyznacza współczynnik mocy  $\cos\phi$ ), a pozostałe dane uzyskuje ze sterownika pomiarowego. Sterownik główny za pośrednictwem elementów wykonawczych centralnie zarządza pracą obiektu. Prawdopodobieństwo występowania zakłóceń oraz konieczność ograniczenia ilości przewodów pomiarowych biegnących wzdłuż toru prądowego generatora uzasadnia zastosowanie dwóch sterowników.

W systemie sterowania zastosowano następujące układy pomiarowe:

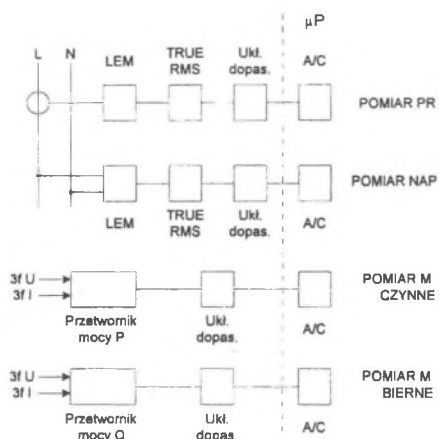
- *wielkości elektrycznych (za pośrednictwem wewnętrznego przetwornika A/C mikrokontrolera), (rys.4):*
  - *mocy czynnej i biernej generatora wykorzystując zewnętrzne przetworniki mocy na sygnał prądowy  $0 \dots \pm 20 \text{ mA}$ ,*
  - *wartości skutecznej (TRUE RMS) napięć fazowych zasilania generatora korzystając z wewnętrznych układów pomiarowych sterownika, z separacją galwaniczną,*
  - *wartości skutecznej (TRUE RMS) prądów generatora korzystając z wewnętrznych układów pomiarowych sterownika, z separacją galwaniczną,*
- *wielkości nieelektrycznych (za pośrednictwem wewnętrznego przetwornika A/C mikrokontrolera), (rys.5):*
  - *temperatur: otoczenia, sterowników, generatora, przekładni i gondoli korzystając z wewnętrznych układów pomiarowych sterownika,*
- *wielkości nieelektrycznych mierzonych cyfrowo, (rys.5):*
  - *położenia gondoli, a tym samym skrócenia kabla wykorzystując zewnętrzny przetwornik kodowy i wejścia cyfrowe sterownika,*
  - *kąta ustawienia łopatek silnika wiatrowego wykorzystując zewnętrzny przetwornik kodowy i wejścia cyfrowe sterownika,*
  - *kierunku wiatru, wykorzystując zewnętrzny przetwornik kodowy steru wiatru i wejścia cyfrowe sterownika,*
  - *prędkości wiatru, wykorzystując zewnętrzny przetwornik obrotowo-impulsowy anemometru i układ szybkich wejść mikrokontrolera (rys.6),*
  - *prędkości obrotowej generatora wykorzystując zewnętrzny przetwornik obrotowo-impulsowy i układ szybkich wejść mikrokontrolera (rys.6),*
  - *prędkości obrotowej wirnika silnika wiatrowego, wykorzystując zewnętrzny czujnik zbliżeniowy i układ szybkich wejść mikrokontrolera (rys.6).*



Rys.3. Schemat blokowy układu sterowania elektrowni wiatrowej

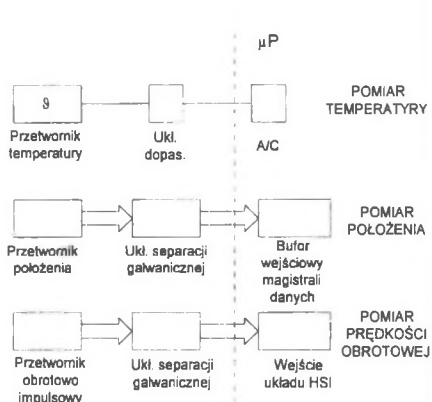
Fig.3. Block diagram of wind turbine control system

Interfejs użytkownika stanowi pulpit umieszczony na płycie czołowej sterownika głównego (rys.2). W jego skład wchodzi wyświetlacz LCD, sygnalizacyjne diody LED i klawiatura. Dodatkowo zastosowano dwa porty szeregowy w standardzie RS 232C do lokalnej obsługi z wykorzystaniem komputera PC (laptop, notebook) oraz do zdalnej komunikacji przez modem analogowy lub cyfrowy.



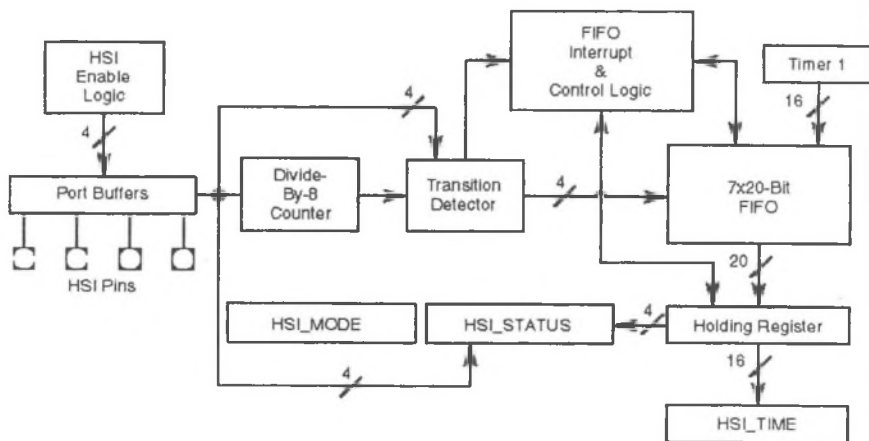
Rys.4. Układy pomiarowe parametrów elektrycznych

Fig.4. Measuring circuits of electrical parameters



Rys.5. Układy pomiarowe parametrów nieelektrycznych

Fig.5. Measuring circuits of non-electrical parameters



Rys.6. Schemat blokowy układu szybkich wejść mikrokontrolera 80C196KC [1]

Fig.6. Block diagram of microcontroller's 80C196KC High Speed Inputs [1]

Sterowniki zaprojektowano i wykonano w technologii montażu powierzchniowego SMD, bazując na mikrokontrolerze 80C196KC firmy INTEL. Jest to mikrokontroler o 16-bitowej architekturze. Bogata lista rozkazów (operacje arytmetyczne) oraz wewnętrzne układy, takie jak 8-kanałowy, 10-bitowy przetwornik A/C, układ szybkich wejść (rys.6.) i wewnętrzny UART przyczyniły się do wyboru tego mikrokontrolera [1]. Układ szybkich wejść został wykorzystany do pomiaru okresu sygnałów z przetworników obrotowo-impulsowych (rys.5).

Korzystając z układu szybkich wejść mierzy się prędkość obrotową wirnika turbiny wiatrowej i wału generatora asynchronicznego oraz prędkość wiatru. Schemat blokowy układu szybkich wejść mikrokontrolera 80C196KC przedstawia rys.6.

### 3.2. Funkcjonowanie systemu sterowania elektrowni wiatrowej

System sterowania oparty na dwóch mikroprocesorowych sterownikach realizuje wszystkie wymagane funkcje sterowania i regulacji obiektu. Można wyróżnić dwa podstawowe stany pracy elektrowni nadzorowanej przez system sterowania:

- praca w trybie automatycznym (stan normalnej pracy),
- praca w trybie sterowania ręcznego.

Tryb automatyczny, standardowy tryb pracy, ma za zadanie zapewnić bezobsługowe funkcjonowanie elektrowni wiatrowej. Układ mikroprocesorowy na bieżąco analizuje warunki uruchomienia lub zatrzymania elektrowni. Jeżeli zostaną stwierdzone korzystne parametry wiatru, uruchamiane są procedury rozruchu. W ramach procedur rozruchu układ sterowania najpierw ustawia gondolę elektrowni na wiatr, następnie zwalnia hamulec na wale generatora. Po osiągnięciu odpowiedniej prędkości obrotowej zostaje przyłączony do sieci elektroenergetycznej generator. Załączenie generatora kończy fazę rozruchu. W trakcie pracy silnika wiatrowego system dobiera optymalny kąt ustawienia łopat w zależności od prędkości wiatru oraz koryguje położenie głowicy względem wiatru. Jednocześnie układ sterowania identyfikuje przekroczenie dopuszczalnych parametrów granicznych. W przypadku przekroczenia wartości progowej układ przeciwdziała do doprowadzenia przekroczonego parametru do przedziału dopuszczalnego. Stwierdzenie niekorzystnych warunków pracy uruchamia procedurę hamowania. W ramach procedury hamowania następuje wyhamowanie aerodynamiczne silnika wiatrowego poprzez ustawienie łopat w tzw. chorągiewkę oraz wyłączenie generatora. Po całkowitym zatrzymaniu obiektu układ sterowania analizuje warunki do ponownego rozruchu.

Tryb ręczny używany jest jedynie przez serwis w trakcie uruchamiania elektrowni wiatrowej w celu sprawdzenia poprawności działania kolejnych obwodów obiektu. Tryb ten umożliwia ręczne sterowanie obiektem pod nadzorem systemu sterowania. Układ sterowania ma za zadanie między innymi nie dopuścić do uszkodzenia elementów elektrowni.

Pulpit sterownika informuje obsługę o aktualnym stanie pracy obiektu. W menu podstawowym zebrano najważniejsze dane pomiarowe charakteryzujące pracę elektrowni wiatrowej. W kolejnych menu użytkownik otrzymuje odpowiednio pogrupowane parametry elektryczne, mechaniczne i wiatru. Wyżej wymienione menu są ogólnodostępne. Dalsze menu chronione przed dostępem osób niewykwalifikowanych wykorzystywane są dla celów obsługi serwisowej.

## 4. ZABEZPIECZENIA ELEKTROWNI WIATROWEJ

### 4.1. Poziomy zabezpieczeń

W elektrowni zastosowano dwa poziomy zabezpieczeń:

- nadrzędne,
- podrzędne.

Zabezpieczenia nadrzędne realizowane są za pomocą blokad elektromechanicznych powodujących trwałe wyłączenie poszczególnych mechanizmów elektrowni. Sterownik podaje

informacje o ich zadziałaniu oraz stara się doprowadzić do programowego zatrzymania obiektu.

Diagnostyka obiektu przeprowadzana jest na bieżąco przez układ sterowania co stanowi podrzędny system zabezpieczeń. Usterki oraz stany niebezpieczne identyfikowane są na podstawie informacji uzyskanych z elementów stykowych (tzw. łączników krańcowych) za pośrednictwem wejść cyfrowych sterownika, a także na podstawie analizy mierzonych wielkości analogowych. Łączniki krańcowe bezpośrednio podają informacje o ewentualnych awariach, natomiast pomiary wielkości analogowych porównywane są z wartościami granicznymi, których przekroczenie powoduje stwierdzenie niebezpiecznego stanu pracy elektrowni.

#### 4.2. Klasyfikacja stanów awaryjnych elektrowni wiatrowej

Stany awaryjne rozpoznawane przez układ sterowania podzielono na trzy grupy. Pierwszą grupę stanowią niegroźne zakłócenia pracy obiektu wykrywane na podstawie niewielkiego przekroczenia wydzielonych parametrów granicznych. Sterownik uruchamia procedurę doprowadzającą przekrozoną wartość parametru do poziomu z dopuszczalnego zakresu oraz informuje obsługę o tym stanie pracy. Przykładowo wzrost temperatury oleju w przekładni mechanicznej powyżej wartości progowej zalicza się do omawianej grupy. Drugą grupę stanowią awarie niestałe. Ich wystąpienie powoduje programowe zatrzymanie silnika wiatrowego i blokadę ponownego rozruchu do czasu ich samoczynnego ustąpienia oraz przedstawienie komunikatu obsłudze. Przykładem awarii z tej grupy jest zablokowanie przetwornika pomiaru kierunku wiatru w wyniku oblodzenia. Do trzeciej grupy awarii zalicza się nienormalne stany pracy poszczególnych urządzeń elektrowni wiatrowej, które mogą doprowadzić do poważnego uszkodzenia obiektu. Są to tzw. awarie zatrzymujące stałe wymagające interwencji serwisu. Układ sterowania dokonuje programowego zatrzymania, blokady kolejnego rozruchu oraz sygnalizuje wystąpienie awarii. Dla tej grupy awarii sterownik wymaga ręcznego potwierdzenia usunięcia usterki. Przykładem awarii stałej jest zadziałanie zabezpieczeń nadprądowych nasuwających podejrzenie o wystąpieniu uszkodzenia elementu wykonawczego, np. zadziałanie zabezpieczenia motoreduktorów obrotu głowicy.

### 5. PODSUMOWANIE

W wyniku prowadzonych prac badawczo-konstrukcyjnych zaprojektowano, wykonano i oprogramowano mikroprocesorowy układ sterowania elektrowni wiatrowej. Przyjęta w początkowej fazie koncepcja rozwiązania systemu sterowania okazała się trafna. Opracowany system sterowania spełnia stawiane mu wymagania przedstawione na wstępie. Omawiany układ sterowania zastosowano w elektrowni wiatrowej w miejscowości Słup koło Legnicy (rys.1). System sterowania pracuje bezawaryjnie od grudnia 1997 roku.

### LITERATURA

1. 8XC196KC/8XC196KDuser's manual, INTEL 1992

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Skoczkowski

Wpłynęło do Redakcji 31 maja 1999 r.

## Abstract

At the beginning of the paper there are presented parameters of the controlled object, which is Polish wind turbine power generator with rated power of 160kW. Fig.1 shows considered wind turbine power generator installed in Slup near Legnica. Next, realisation of the control system consisting of two interlinked microprocessor based controllers (Fig.3). Electrical and non-electrical parameters measuring circuits are presented. Their block diagrams are shown in Figs.4 and.5. Fig.6 shows the block diagram of the microcontroller 80C196KC high speed inputs, which have been used to measure generator shaft rotation and wind speed. These parameters are measured by optical incremental encoders. The following paragraph describes the control system operating in automatic and manual modes. The control system allows fully automatic, maintenanceless object operation. Protection systems are realised by hardware and software. Their task is not to let serious damages happen. Hardware protections are superior to the software ones. They stop operation of the wind turbine power generator if they take action. Software protections are realised by microprocessor controllers and perform object diagnostic continuously. The acquired data let the controller identify serious danger conditions and bring the wind turbine to stop under control or if it is possible they keep it working. The supervising system tries to control object in such a way that the object parameters, which are out of the permissible limits, go back within safety limits. LCD display and LEDs on the main controller's front panel (Fig.2) show the current state of the object and present the measured data. The described control system has been applied in the wind turbine power generator in Slup near Legnica.