

## MODELOWANIE MAŁEJ ELEKTOWNI WIATROWEJ

Mirosław WŁAS<sup>1</sup>, Krzysztof MELLER<sup>2</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel: +48 58 347 23 37 fax: +48 58 341 08 80 e-mail: m.wlas@ely.pg.gda.pl
2. Miejsce pracy  
tel: fax: e-mail:

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono model elektrowni wiatrowej o mocy 8500W wyposażonej w generator z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi. W oparciu o analizę dostępnej literatury naukowej [1, 2, 3, 4], norm technicznych [5], opracowano model elektrowni wiatrowej, który został zaimplementowany w środowisku Matlab Simulink. Model ten pozwala przeprowadzić analizę elektrowni wiatrowej, w której regulacja wytwarzanej energii odbywa się z wykorzystaniem elektronicznie sterowanego siłownika, regulującego położenie steru tylnego. Tym samym sprawia, że elektrownia wiatrowa odchodzi od wiatru w przypadku zbyt dużej prędkości wiatru. Do sterowania sterem tylnym elektrowni wykorzystano regulator rozmyty. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych układu regulacji elektrowni wiatrowej przy słabych i silnych podmuchach wiatru.

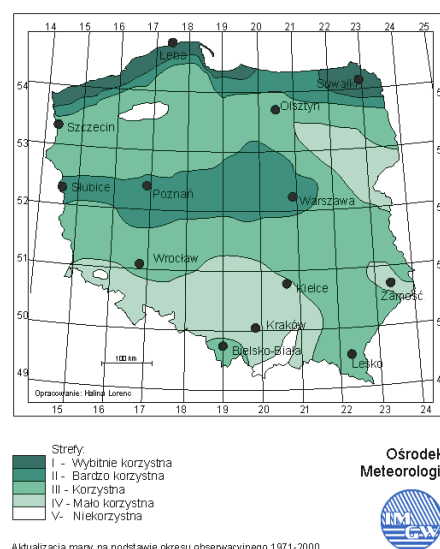
**Słowa kluczowe:** małe elektrownie wiatrowe, modelowanie, Matlab Simulink.

## 1. WPROWADZENIE

## 1.1. Energetyka wiatrowa

Pozyskiwanie energii z wiatru obecnie jedna z najbardziej efektywnych i opłacalnych metod wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Na Rys. 1 przedstawiono mapę Polski, w której wydzielone są obszary spośród sześciu klas określających, czy istnieją warunki do wykorzystania energii wiatru. Ocenia się, że przy obecnych konstrukcjach elektrowni wiatrowych, najbardziej korzystne tereny, to te w których średnia roczna prędkość wiatru na 70m n.p.g. nie jest mniejsza niż 7m/s.

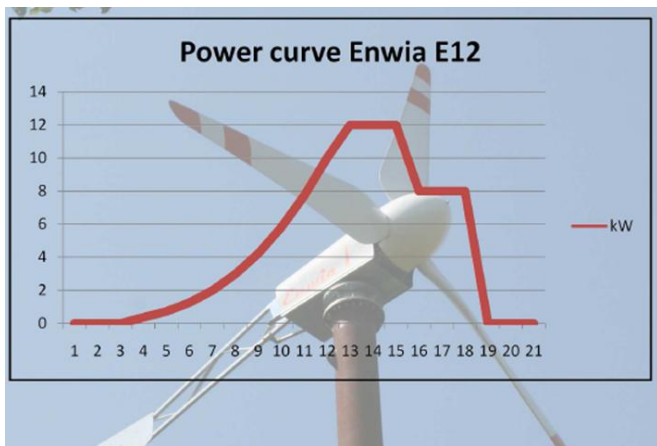
W obszarach korzystnych wiatrów postawiono już kilka farm wiatrowych, a na kilkanaście wydano warunki przyłączenia. Ograniczenia techniczne z przesyłem energii powodują, że korzystnym wydaje się budowanie małych elektrowni wiatrowych, których wysokość nie przekracza 30 m (brak konieczności wykonania Raportu Oddziaływania na Środowisko [7]). Przy takim założeniu maksymalna moc elektrowni wiatrowej nie przekracza 40kW, zaś energia z generatora poprzez przekształtnik energoelektroniczny przekazywana jest bezpośrednio do sieci elektroenergetycznej. Takie rozwiązanie wydaje się najbardziej racjonalne i przy jego projektowaniu dużą uwagę skupia się na tym, aby wydobyć z wiatru jak największą ilość energii, co powoduje, że układ sterowania staje się interesującym zagadnieniem naukowym.

Strefy energetyczne wiatru w Polsce  
Mezoskala

Rys. 1. Strefy energetyczne wiatru w Polsce (źródło: [6])

## 1.2. Budowa małej elektrowni wiatrowej

Do zamodelowania elektrowni wiatrowej wykorzystano parametry produkowanej w Szczecinie siłowni Enwia E12 z generatorem synchronicznym z magnesami trwałymi z silnikiem wiatrowym o średnicy  $D=5,37$  m, umieszczonej na wieży o wysokości 18m, której widok gondoli i krzywą mocy przedstawiono na Rys. 2. W elektrowni zastosowano siłownik elektryczny, bramowy o mocy 80W do składania steru tylnego. Sposób działania takiego mechanizmu jest prosty. W momencie, kiedy silnik wiatrowy nie zajmuje położenia prostopadłego do kierunku wiatru, na ster działa siła boczna, co powoduje obrót gondoli do kierunku wiatru. Przyjmuje się, że długość ramienia steru powinna być równa długości łopaty silnika wiatrowego. Mechanizm ten posiada jedną wadę, aby ster działał cały czas musi działać siła boczna, która odchyła o kilka stopni (do  $10^\circ$ ) silnik wiatrowy od prostopadłego kierunku wiatru w czasie normalnej pracy. Główną zaletą nastawiania silnika wiatrowego pod wiatr za pomocą steru kierunkowego jest możliwość wykorzystania tego mechanizmu do regulacji mocy turbiny wiatrowej.

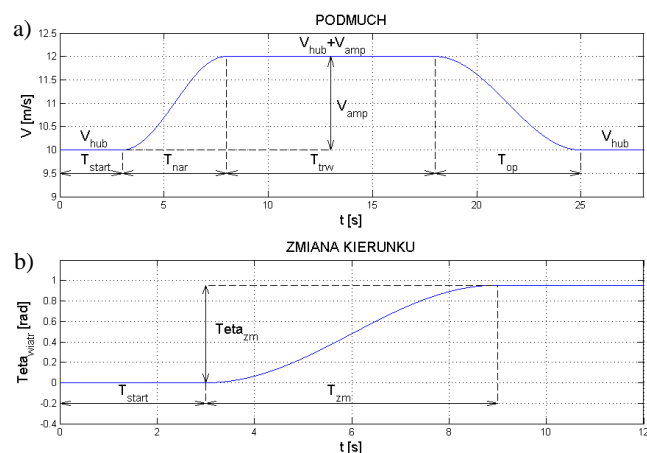


Rys. 2. Krzywa mocy i zdjęcie elektrowni E12 (źródło [8])

## 2. MODEL SYMULACYJNY ELEKTROWNI

### 2.1. Modelowanie wiatru

Przy projektowaniu turbozespołów wiatrowych, zgodnie z obowiązującą normą [5], należy uwzględnić wszystkie warunki środowiskowe, w jakich może znaleźć się przyszła elektrownia wiatrowa. Do najważniejszych warunków środowiskowych należą warunki wiatrowe, wśród których można wyróżnić warunki normalne oraz ekstremalne. Do normalnych warunków wiatrowych zalicza się podmuch wiatru (rys. 3a), który charakteryzuje się krótkotrwałą zmianą prędkości o pewną amplitudę  $V_{amp}$ , z czasem trwania  $T_{trw}$ , czasem narastania  $T_{nar}$ , oraz czasem opadania  $T_{op}$ . Wśród podmuchów wiatru występuje tendencja, że im większa prędkość średnia 10 min wiatru  $V_{hub}$  tym amplituda przyrostu prędkości  $V_{amp}$  jest większa. Związane jest to z tym, że wartość  $V_{amp}$  określa się zwykle jako 20% średniej prędkości 10 min wiatru  $V_{hub}$ . W normalnych warunkach wiatrowych może dojść także do zmiany kierunku wiania wiatru o kąt  $Teta_{zm}$ . Zmiana kierunku podczas normalnej pracy turbozespołu zależy w dużej mierze od czynników lokalnych. Znormalizowany przypadek ekstremalnej zmiany kierunku przedstawiono na rys. 3b.



Rys. 3a. Podmuch normalny wiatru przy  $V_{hub}=10\text{m/s}$ ,  $V_{amp}=2\text{m/s}$ ,  $T_{start}=3\text{s}$ ,  $T_{nar}=5\text{s}$ ,  $T_{trw}=10\text{s}$ ,  $T_{op}=7\text{s}$

Rys. 3b Ekstremalna zmiana kierunku wiatru przy  $V_{hub}=10\text{m/s}$ ,  $T_{start}=3\text{s}$

### 2.2. Model matematyczny

W oparciu o analizę dostępnej literatury [1, 2, 3, 4], norm technicznych [5], opracowano model elektrowni wiatrowej (rys. 4), który został zaimplementowany do środowiska Matlab Simulink z wykorzystaniem przyborników Fuzzy Toolbox. Model ten pozwala przeprowadzić analizę elektrowni wiatrowej, w której regulacja wytwarzanej energii odbywa się z wykorzystaniem elektronicznie sterowanego siłownika, regulującego położenie steru tylnego. Tym samym sprawia, że elektrownia wiatrowa odchodzi od wiatru w przypadku zbyt dużej prędkości wiatru. Przy tworzeniu modelu matematycznego turbozespołu wiatrowego zdecydowano podzielić dynamikę całego układu na poszczególne podsystemy:

- model wiatru z uwzględnieniem zarówno normalnych jak i ekstremalnych warunków wiatrowych;
- model dynamiki steru tylnego, którego wychyleniem steruje siłownik (sterowanie to wykorzystuje zasady sterowania rozmytego);
- model dynamiki koła wiatrowego z uwzględnieniem charakterystyki współczynnika mocy w funkcji wyróżnika szybkobieżności;
- model mechanicznych kołysań własnych biorący pod uwagę jako źródła kołysań: asymetrię koła wiatrowego, przejście łopat przed wieżą oraz elastyczność łopat;
- model zespołu napędowego zakładający istnienie dwóch skupionych mas (tzw. model dwumasowy);
- model generatora z przekształtnikiem energoelektronicznym wraz z nadrzędnym regulatorem mocy oraz algorytmem poszukiwania ekstremalnej krzywej mocy.

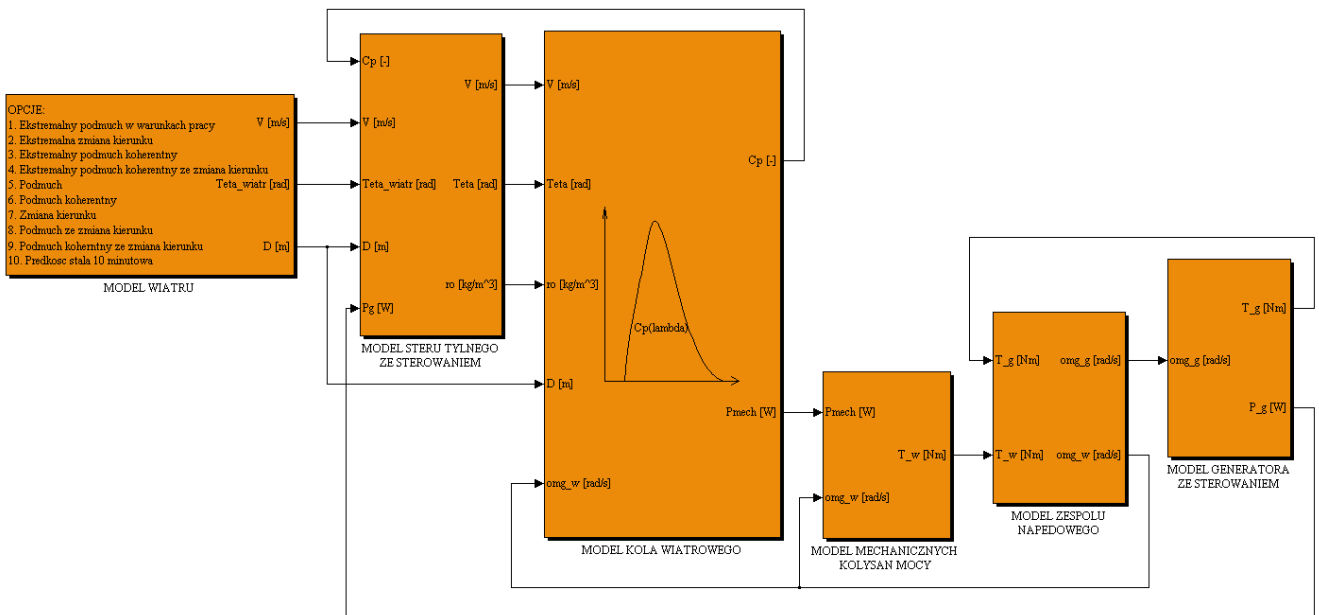
### 2.3. Układ sterowania sterem tylnym

Najprostszym sposobem na regulację wychylenia steru tylnego jest wykorzystanie do tego zwykłego siłownika. Pracą tego urządzenia może sterować z mikrokontrolera, który steruje także pracą przekształtnika energoelektronicznego przekształcającego energię z generatora do sieci elektroenergetycznej. Mikrokontroler na podstawie otrzymanych danych takich jak prędkość wiatru, czy też wartość mocy wytwarzanej przez generator zadawałby odpowiednie wychylenie siłownikowi. Jedne z nich to algorytmy, które w swoim działaniu wykorzystują elementy logiki rozmytej. Ten rodzaj algorytmów pozwala na zaimplementowanie wiedzy eksperckiej oraz często okazuje się najlepszym rozwiązaniem w przypadku obiektów sterowania, w których występują silne nieliniowości. Ze względu na te zalety postanowiono wykorzystać sterowanie rozmyte w modelowanym układzie.

Przed przystąpieniem do formułowania bazy reguł określono, jakie dane wejściowe będą wykorzystywane w procesie sterowania, tak więc sygnał wyjściowy będzie generowany na podstawie:

- pomiaru prędkości wiatru  $V$ ;
- parametru przeciążenia  $Pp\%$ , który definiuje się jako procentową wartość przekroczenia znamionowej mocy generatora;
- względnego czasu trwania przeciążenia  $Tp$ .

Przy sporządzaniu funkcji przynależności dla poszczególnych wejść i wyjścia regulatora rozmytego posłużono się znajomością podstawowych zasad opisujących stan pracy generatora synchronicznego z magnesami trwałymi. Otóż założono że możliwe jest przeciążenie tej maszyny nie większe niż 20% wartości mocy znamionowej tego urządzenia. Dodatkowo praca podczas przeciążenia nie może trwać dłużej niż 3 minuty, po czym generator ten nie



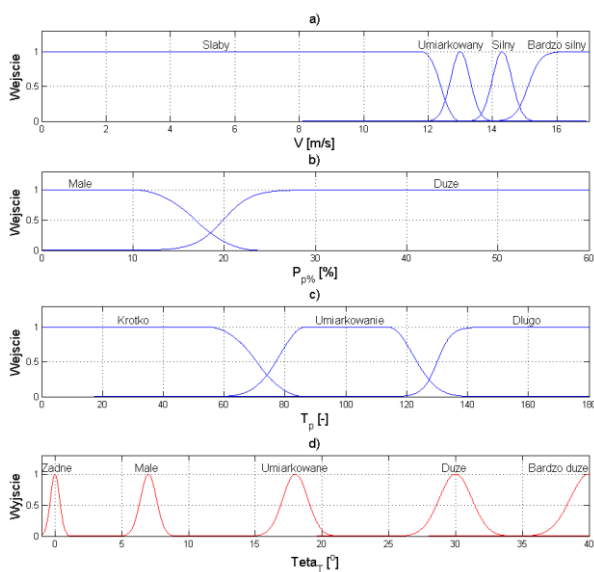
Rys. 4. Model elektrowni wiatrowej w programie Matlab-Simulink

powinien przekraczać mocy znamionowej przez czas wynoszący czterokrotność czasu jego pracy w przeciążeniu.

Opisane powyżej informacje pozwoliły na stworzenie podziału poszczególnych dziedzin argumentów wejść i wyjścia regulatora rozmytego na zakresy określone przez zmienne lingwistyczne:

- dla wejścia  $V$  (prędkość wiatru): słaby, umiarkowany, silny, bardzo silny;
- dla wejścia  $P_{p\%}$  (przeciążenie): duże małe;
- dla wejścia  $T_p$  (względny czas przeciążenia): krótki, umiarkowany, długi;
- dla wyjścia  $Teta_T$  (kąt wychylenia steru): żaden, mały, umiarkowany, duży, bardzo duży.

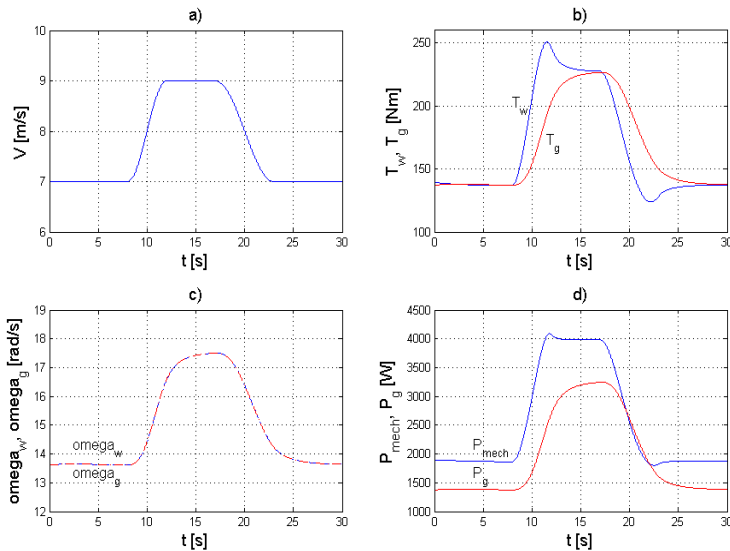
Następnie dla każdego zbioru rozmytego (zmiennej lingwistycznej) sporządzono odpowiednią funkcję przynależności określającą w jakim stopniu wartość danego argumentu przynależy do zmiennej lingwistycznej (rys. 5).



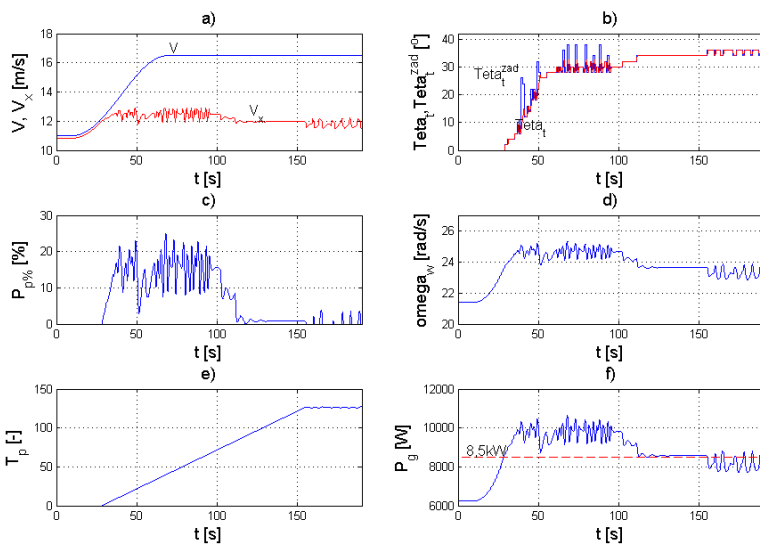
Rys. 5. Funkcje przynależności oraz odpowiadające im zmienne lingwistyczne dla: a) wejścia  $V$  – prędkość wiatru; b) wejścia  $P_{p\%}$ , – parametru przeciążenia; c) wejścia  $T_p$  – względnego czasu trwania przeciążenia; d) wyjścia  $Teta_T$  – wychylenie steru tylnego

### 3. BADANIA SYMULACYJNE

Przeprowadzono symulację pracy turboszespolu dla dwóch różnych podmuchów wiatru. Pierwszy z nich charakteryzuje się czasem trwania, wynoszącym 5s (rys. 6). W tym przypadku odpowiedź układu ma charakter nadążny i przebiega bez oscylacji. Na wykresach prędkości obrotowej koła wiatrowego oraz generatora nie pojawiają się żadne przesunięcia, czy też różnice w przebiegach, co oznacza, że w układzie przeniesienia napędu nie dochodzi do oscylacji skrętnych. W pierwszej symulacji generowana moc podczas podmuchu stabilizuje się i przez okres 4s wynosi 3.25kW, po czym maleje i osiąga z powrotem wartość 1.9kW. Natomiast w drugiej symulacji przetestowano regulator podczas podmuchu koherentnego, w którym przyrost prędkości wiatru z wartości 11m/s do 16.5 m/s odbywa się przez okres 60s. Wyniki tak przeprowadzonej symulacji przedstawiono na rys. 7. Z otrzymanych przebiegów wynika, że regulator częściowo spełnił swoją rolę. Tak jak założono dopuścił on do pracy generatora przy przeciążeniu przez okres czasu nie przekraczający 3 min (czas ten wyniósł 125s), po czym zaczął ograniczać moc wyjściową elektrowni do wartości znamionowej maszyny. Można dopuścić chwilową pracę przy przeciążeniu, ale jednocześnie należy zadbać o właściwą wentylację urządzenia. Aby model matematyczny dobrze opisywał pracę układu rzeczywistego, wypracowywana odpowiedź z regulatora rozmytego na podstawie danych wejściowych jest analizowana przez układ co okres czasu wynoszący 1s. Dzięki temu siłownik nie nadąży cały czas za zmieniającą się w sposób dynamiczny zadaną wartością z regulatora, lecz dokonuje korekty położenia co 1s. Taki zabieg sprawia, że proces zużycia się tego elementu przebiega znacznie dłużej. Jednocześnie założono, że skok siłownika umożliwia zmianę położenia steru o dwa stopnie, tak więc odpowiedź z układu regulatora przyjmując tylko parzyste wartości z przedziału od 0 do 40 stopni. Podobne wyniki otrzymano symulując zmianę kierunku wiatru. Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że regulator ten mógłby sterować pracą siłownika a tym samym regulować wychyleniem steru tylnego.



Rys. 6. Wyniki symulacji dla poddmuchu o parametrach  $V_{hub}=7\text{m/s}$ ,  $V_{amp}=2\text{m/s}$ ,  $T_{nar}=4\text{s}$ ,  $T_{trw}=5\text{s}$ ,  $T_{op}=6\text{s}$ : a)  $V$  – prędkość wiatru; b)  $T_w$  – moment obrotowy silnika wiatrowego,  $T_g$  – moment oporowy generatora; c)  $\omega_w$  – prędkość obrotowa wału turbiny,  $\omega_g$  – prędkość obrotowa wału generatora; d)  $P_{mech}$  – moc mechaniczna turbiny wiatrowej,  $P_g$  – moc generatora.



Rys. 7. Wyniki symulacji przy poddmuchu koherentnym ( $V_{hub}=11\text{m/s}$ ,  $T_{nar}=60\text{s}$ ,  $V_{amp}=5.5\text{s}$ ): a)  $V$  – prędkość wiatru,  $V_x$  – składowe prędkości wiatru prostopadła do koła wiatrowego; b)  $Teta^{zad}$  – zadany kąt wychylenia steru wypracowany przez regulator rozmyty,  $Teta$  – rzeczywisty kąt odchylenia steru tylnego; c)  $P_p\%$  – parametru przeciążenia; d)  $\omega_w$  – prędkość obrotowa wału turbiny; e)  $T_p$  – względnego czasu trwania przeciążenia; f)  $P_g$  – moc generatora.

## 4. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule skupiono się na przedstawieniu wyników pracy regulatora rozmytego sterującego pracą steru tylnego małej elektrowni wiatrowej. Należy jednak wyjaśnić, że dzięki znajomości rzeczywistego obiektu udało się odzwierciedlić komputerowo pełen model elektrowni wiatrowej z wszystkimi momentami bezwładności w płaszczyźnie obrotu gondoli jak i silnika wiatrowego.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- Anderson J. D.: "Fundamentals of Aerodynamics", McGraw-Hill Science Engineering, New York 2005.
- Hau E.: "Wind Turbines - Fundamentals, Technologies, Application, Economics - 2nd edition", Springer, New York 2006.
- Jagodźński W.: "Silniki wiatrowe", Polskie Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1959.
- Lubośny Z.: „Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
- PN-EN 61400-2: „Turbozespoły wiatrowe. Część 2: Wymagania projektowe dotyczące małych turbozespołów wiatrowych.”, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
- <http://www.imgw.pl> – Strona Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2004 r. w sprawie określenia rodzajów przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko. Dz. U. Nr 257 Poz. 2573
- [www.enwia.pl](http://www.enwia.pl) - producent elektrowni wiatrowych firma Enwia Aleksander Okrój ul. Lawendowa 15, 71-006 Szczecin

## MODELING OF SMALL WIND POWER PLANT

**Key-words:** small wind power plant, modeling, matlab simulink.

In the paper it is presented control system of small wind power plant based fuzzy-logic controller. This technique can improve the performance of generation system when strong wind appear. The maximum available output power obtain the same level during wind change because the controller change the tail angle. Simulation results are presented to demonstrate reliability of proposed controller. The model of wind and model of wind power plant was prepared in Matlab Simulink program.