

# ZASTOSOWANIE METOD SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W MODELU ELEKTROWNI WIATROWEJ

**dr inż. Grzegorz Barzyk**  
Instytut Elektrotechniki  
Politechnika Szczecińska

W publikacji Autor, bazując na swojej rozprawie doktorskiej przedstawił koncepcję pracy modelu elektrowni wiatrowej wykorzystującej metody sztucznej inteligencji, w tym regulacji rozmytej i sieci neuronowych.

## 1. WSTĘP

Proces konwersji energii wiatru na energię elektryczną za pośrednictwem siłowni wiatrowej, ze względu na niestacjonarność sygnału wymuszającego jakim jest wiatr oraz złożoność elektromechanicznych części siłowni wiatrowej, jest przykładem niestacjonarnego i dynamicznego procesu nieliniowego.

W modelowanym układzie przemiany energii ma się do czynienia z wieloma zmiennymi: aerodynamicznymi, mechanicznymi i elektrycznymi. Systemy sterowania zapewniające kontrolę tych zmiennych, mogą zapewnić zwiększenie ilości produkowanej energii oraz zapobiec szeregowi przeregulowań (np. w zakresie mocy oddawanej przy żądaniu regulacji stałowartościowej), choć zastosowanie i praktyczne wykorzystywanie tych systemów stanowi zwykle swoisty kompromis.

Nadmierne rozbudowywanie układów sterowania oraz podsystemów wchodzących w ich skład (sprzętowe i programowe), oprócz zwiększenia prawdopodobieństwa uszkodzenia poszczególnych składowych systemu powoduje zwiększenie tzw. potrzeb własnych, zwłaszcza energetycznych i wydłużenie czasu reakcji na ewentualne działanie systemu. Zbyt ubogi system sterowania może spowodować natomiast zwiększone ryzyko utraty optymalnych jego efektów w stosunku do zaistniałych wymuszeń.

Optymalizacja zadań układu sterowania elektrowni wiatrowej skupia się zwykle na osiągnięciu maksymalnej mocy produkowanej przez siłownię wiatrową, przy jednoczesnej minimalizacji wpływu zarówno obciążeń tzw. sieciowych, jak i zmian prędkości wiatru. Zagadnienie to, w przypadku „konwencjonalnych” układów sterowania jest tym trudniejsze do realizacji, że sygnał wejściowy w postaci wiatru oddziałuje na rotor siłowni nie tylko jako wymuszający ciągły, lecz często także jako gwałtownie turbulentny oraz wywołujący nieoczekiwane wpływy hamujące.

Przy złożonym obiekcie uzyskanie, a zwłaszcza praktyczna implementacja opisu analizowanego procesu jest zadaniem trudnym. Dysponując dostępnymi dziś możliwościami technicznymi, umożliwiającymi np. zbieranie, katalogowanie, a także uaktualnianie rzeczywistych zachowań oraz interakcji pomiędzy poszczególnymi komponentami elektrowni

wiatrowej, sensowne wydaje się więc wykorzystywanie wiedzy eksperckiej, stanowiącej podstawę do stosowania metod sztucznej inteligencji.

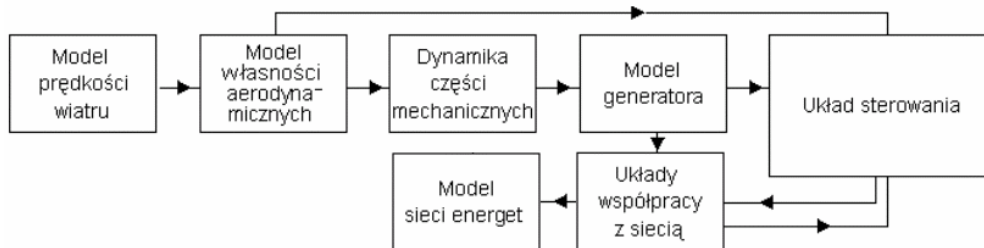
Bazując na powyższym stwierdzeniu przyjąć można, że układ sterowania wykorzystujący metody sztucznej inteligencji, w tym w szczególności zasady logiki rozmytej, a także modelowanie złożonych zjawisk w oparciu o struktury sieci neuronowej może umożliwić bardziej inteligentne zachowania w zakresie predykcji zarówno warunków atmosferycznych (prędkość wiatru, temperatura), jak i w zakresie szacowania oraz uwzględniania operacyjnego zużycia elementów siłowni.

## 2. MODELOWANIE UKŁADU PRACY ELEKTROWNI WIATROWEJ

Działanie układów sterowania, wykorzystujących zasady logiki rozmytej lub układów opartych o sieci neuronowe, wymaga wbudowania do nich dodatkowych systemów wspomagających, które umożliwiają bieżące uaktualnianie zasobów wiedzy eksperckiej.

Wypełnieniu tego celu służy zwykle modelowanie różnych zjawisk wchodzących w skład procesu konwersji wiatru i jego poszczególnych składników, takich jak model prędkości wiatru, model własności aerodynamicznych układu elektrowni, model układów mechanicznych oraz generatora elektrycznego.

W procesie tworzenia całościowego modelu elektrowni wiatrowej, bazując na przyjętych założeniach Autor skupił się więc na opracowaniu modelu, schematycznie przedstawionego na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy przyjętego układu elektrowni wiatrowej

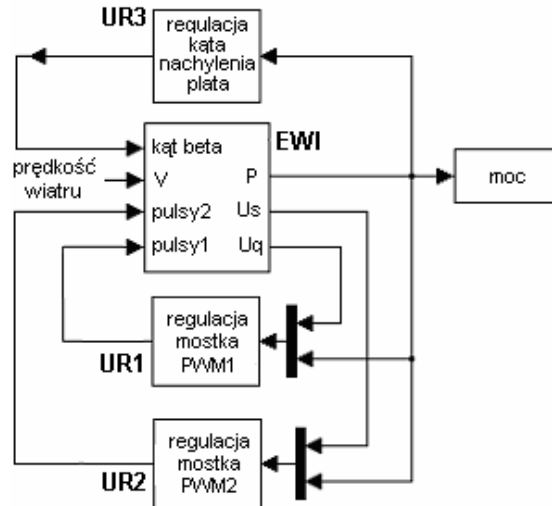
Opracowany całościowy model elektrowni wiatrowej zrealizowano w środowisku Matlab Simulink® jako odpowiadający cechom trójpłatowej elektrowni wiatrowej typu HAWT z aktywnym systemem regulacji kąta nachylenia płatów wirnika. Założono w nim, m.in. iż elektrownia wiatrowa sprzęgnięta jest z systemem energetycznym poprzez energoelektroniczny układ prostownikowo falownikowy pracujący na zasadzie regulacji szerokości impulsu PWM (*ang. pulse width modulation*).

Zastosowany układ sterowania zrealizowano z wykorzystaniem trzech regulatorów rozmytych. Posiadając informacje o bieżącej prędkości wiatru, jak również wartościach mierzonych wielkości elektrycznych (mocy czynnej oddawanej do sieci, wartości napięcia sieci), układ ten wypracowuje aktualną wartość kąta nachylenia płata wirnika tworząc taką modulację sygnału oddawanego (mocy oddawanej do sieci), która zapewnia sterowanie żądane przez operatora elektrowni wiatrowej.

Zakładając konieczność minimalizacji wahań mocy czynnej wprowadzanej do systemu, w możliwym dla danych warunków wietrzności stanie pracy elektrowni wiatrowej, regulatory *fuzzy logic* zmniejszają poziom oddawanej mocy do żądanego przez operatora (przy przekroczeniu prędkości wiatru ponad minimalną wartość gwarantującą produkcję mocy nominalnej). Zmniejszenie to odbywa się zarówno przez zmianę kąta wychylenia płata wirnika, jak również przez właściwą modulację PWM w pośredniczącym układzie energoelektronicznym. Układ prostownikowo-falownikowy w zależności od sytuacji realizuje funkcje prostownika bądź falownika, dostosowując tryb pracy do fazy np. rozruchu lub pracy ciągłej.

Zarówno w przypadku, w którym osiągnięcie określonego poziomu mocy jest ze względu na zbyt małą prędkość wiatru niemożliwe, jak również w sytuacji związanej z niepożądanymi fluktuacjami mocy na skutek turbulencji wiatru - układ sterowania dąży do minimalizacji wahań mocy oddawanej do sieci w możliwie najkrótszym czasie.

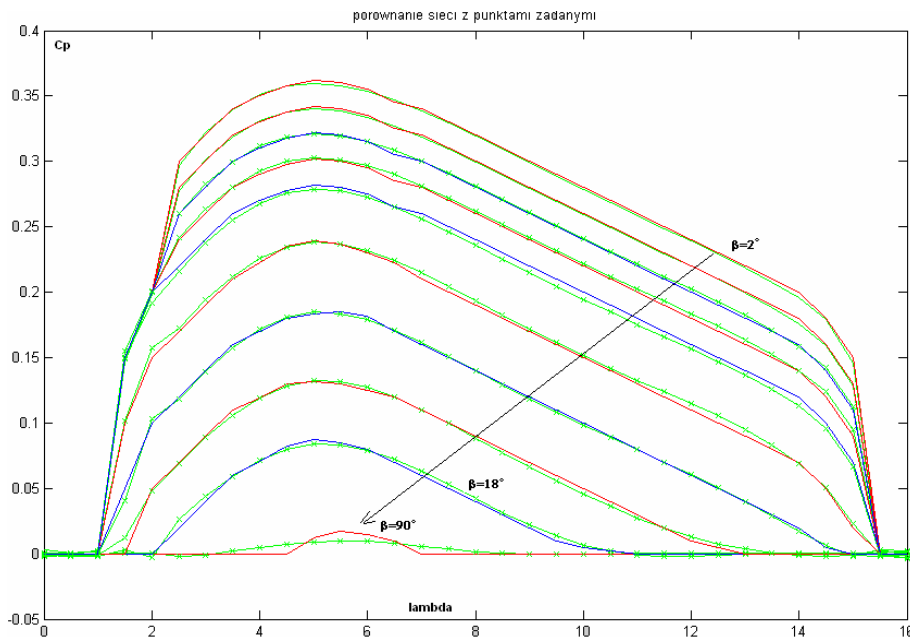
Ogólny schemat blokowy przedstawiający ideę pracy wykonanego układu sterowania przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy przyjętego układu regulacji elektrowni wiatrowej

Sygnałem wymuszającym pracę tak zamodelowanej elektrowni wiatrowej może być odpowiadający zmienności wiatru rzeczywistego model wiatru (na przykład przebieg sygnału powstałego na bazie filtru Butterwortha). W [5] oprócz powyższego, z powodzeniem wykorzystano także pobudzenie modelu elektrowni wiatrowej sygnałem otrzymanym z pomiarów rzeczywistego wiatru zmierzonego w warunkach terenowych.

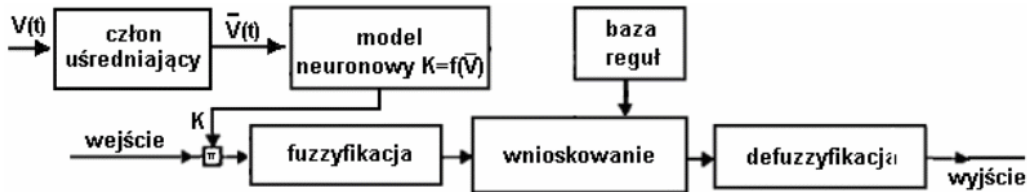
Do odwzorowania charakterystyk aerodynamicznych związanych z geometrią płatów wirnika wykorzystano sztuczną sieć neuronową. Porównanie zadanych i otrzymanych przebiegów  $c_p(\lambda)$  pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Porównanie zadanych i otrzymanych z sieci neuronowej przebiegów  $c_p(\lambda)$  dla kąta  $\beta=(2\div 18)^\circ$

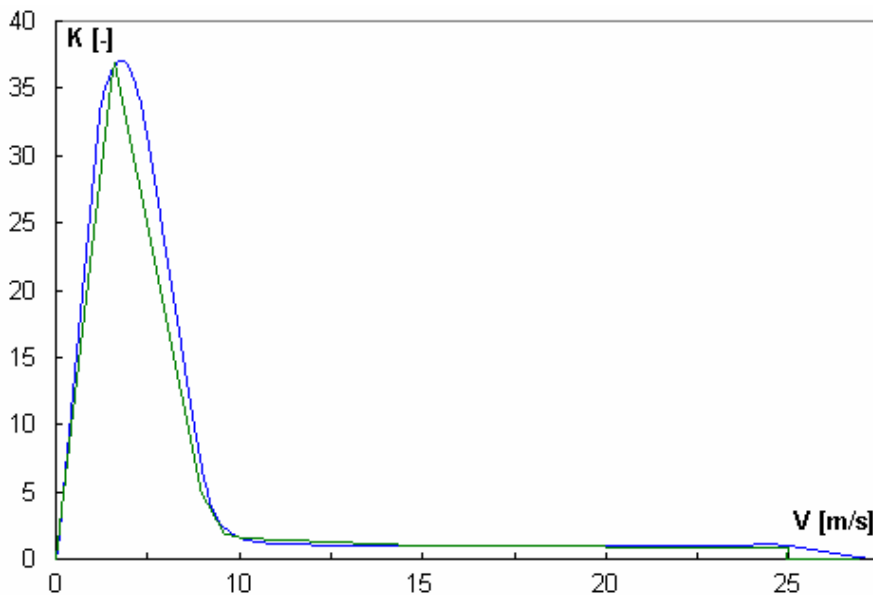
Zadaniem przyjętej sieci neuronowej do wykorzystania w badanym modelu elektrowni wiatrowej stało się szybkie i dokładne odtwarzanie charakterystyki  $c_p(\lambda)$  dla zadanej wartości kąta nachylenia płyta wirnika  $\beta(t)$ . W trakcie badań symulacyjnych stwierdzono, że do zamodelowania przyjętych charakterystyk  $c_p(\lambda)$  wykorzystać można trzywarstwową sieć neuronową w układzie 6-6-1, strojoną metodą wstecznej propagacji błędu.

W trakcie symulacji, stwierdzono ponadto konieczność zastosowania w układzie regulacji mostków PWM specyficznego układu regulatorów rozmytych. Ich schemat funkcjonalny przedstawiono na rys.4.



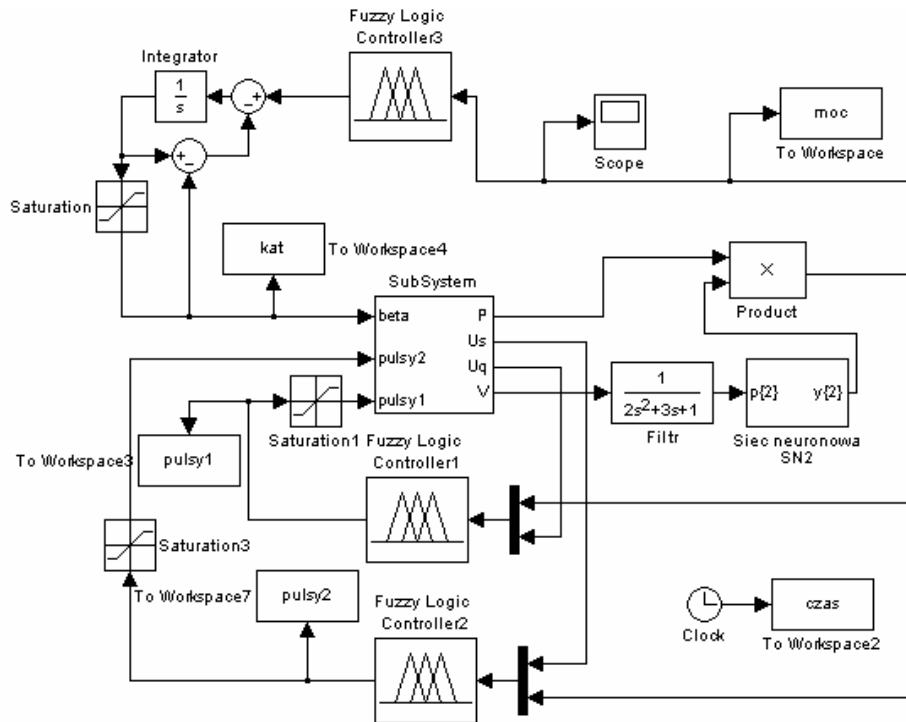
Rys. 4 Schemat funkcjonalny skorygowanego regulatora rozmytego

Wartość współczynnika korekcyjnego  $K$  uzależniono od „uśrednionej” prędkości wiatru  $\bar{V}(t)$  poprzez specjalnie dla tego celu dobraną w procesie iteracyjnym charakterystykę  $K = f(\bar{V}(t))$ . Charakterystyka ta została zamodelowana za pomocą oddzielnej struktury trzywarstwowej sieci neuronowej o układzie 3-3-1. Kształt tej charakterystyki i odpowiedź odpowiednio nauczonej sieci neuronowej pokazano na rys. 5.



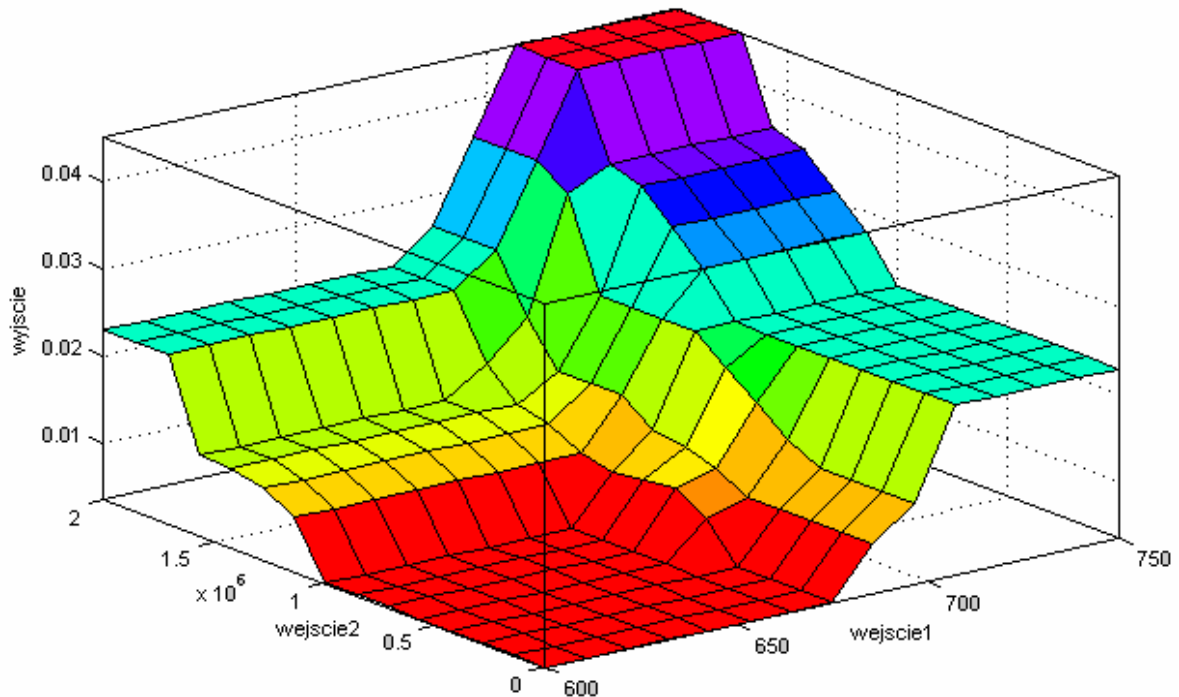
Rys. 5. Zależność współczynnika korekcyjnego  $K$  w funkcji prędkości wiatru

Zmniejszenie wpływu turbulencji wiatru (gwałtownych podmuchów), mogących oddziaływać na układ sterowania, zrealizowano poprzez wprowadzenie do układu regulacji inercji drugiego rzędu (filtru dolnoprzepustowego) ze stałą czasową rzędu kilku sekund. Jak stwierdzono w procesie symulacji, wprowadzenie tej inercji w sposób znaczący poprawiło uzyskiwane efekty regulacyjne. Schemat przyjętego do symulacji układu regulacji przedstawiono na rys.6.



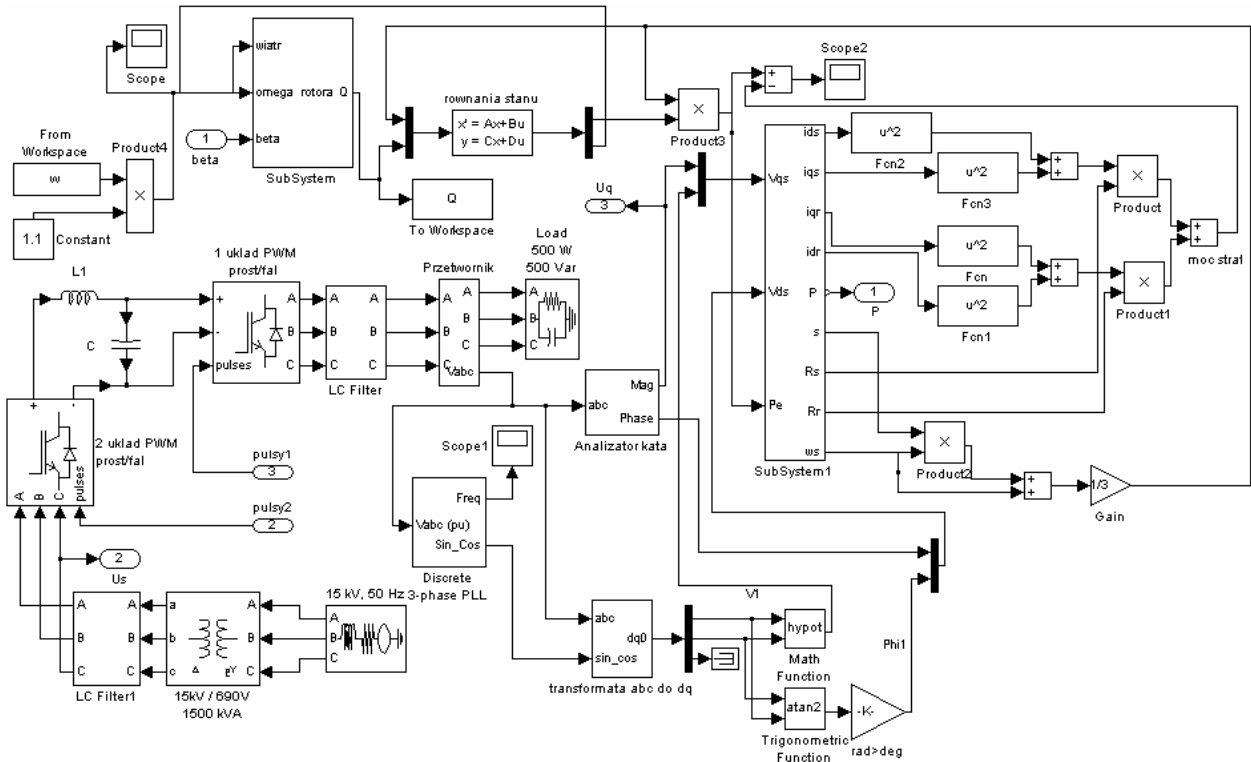
Rys. 6. Struktura przyjętego układu regulacji elektrowni wiatrowej

W zaproponowanym układzie regulacji za modulację przebiegu napięcia bloków prostownikowo/falownikowych PWM odpowiadają regulatory rozmyte *FLC1* i *FLC2*. Regulatory te, w oparciu o pomiar wielkości napięcia w punkcie przyłączenia do sieci (lub generowanego) oraz wartości mocy czynnej tam oddawanej, wyznaczają w odpowiednich blokach PWM moduł szerokości impulsu, kształtującego przebieg napięcia. Przykładową powierzchnię strojenia regulator *FLC1* (o dwóch wejściach i jednym wyjściu) przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Powierzchnia sterowania regulatora *FLC1*

Pełny, blokowy schemat funkcjonalny sporządzonego modelu elektrowni wiatrowej, łączący wszystkie analizowane w rozprawie części modelu przedstawiono na rys. 8.



Rys 8. Matematyczny model elektrowni wiatrowej zaimplementowany w pakiecie Matlab Simulink ®

### 3. BADANIA SYMULACYJNE I WNIOSKI

Dla większości problemów rozwiązywanych przy pomocy systemów wykorzystujących zasoby wiedzy eksperckiej, zwykle trudno jest z góry określić ciąg czynności prowadzących do zadowalającego rozwiązania. Tym samym, realizując heurystyczną strategię osiągnięcia zamierzonych efektów sterowania, w przeprowadzanych badaniach symulacyjnych, w przypadku stwierdzenia takiej konieczności, wielokrotnie powtarzano część symulacji, modyfikując zarówno założoną strukturę układu regulacji, jak i nastawy (krzywe rozmywania i ostrzenia) poszczególnych elementów układu regulacji.

W pierwszej części badań symulacyjnych analizie poddano oddziaływanie modelu elektrowni wiatrowej na sygnał pobudzający, wygenerowany w opracowanym modelu wiatru (wiatr modelowy). Natomiast drugą część badań przeprowadzono dla sprawdzenia i porównania obiektu modelowego z podobnym obiektem rzeczywistym. W tej części symulacji zamodelowana elektrownia wiatrowa poddana została wpływowi wiatru zmierzonego w warunkach terenowych. Mierzonemu przebiegowi prędkości wiatru towarzyszyły także pomiary parametrów wybranych pod kątem późniejszego porównania pracy rzeczywistej elektrowni wiatrowej z zachowaniem się modelu w warunkach maksymalnie do siebie zbliżonych.

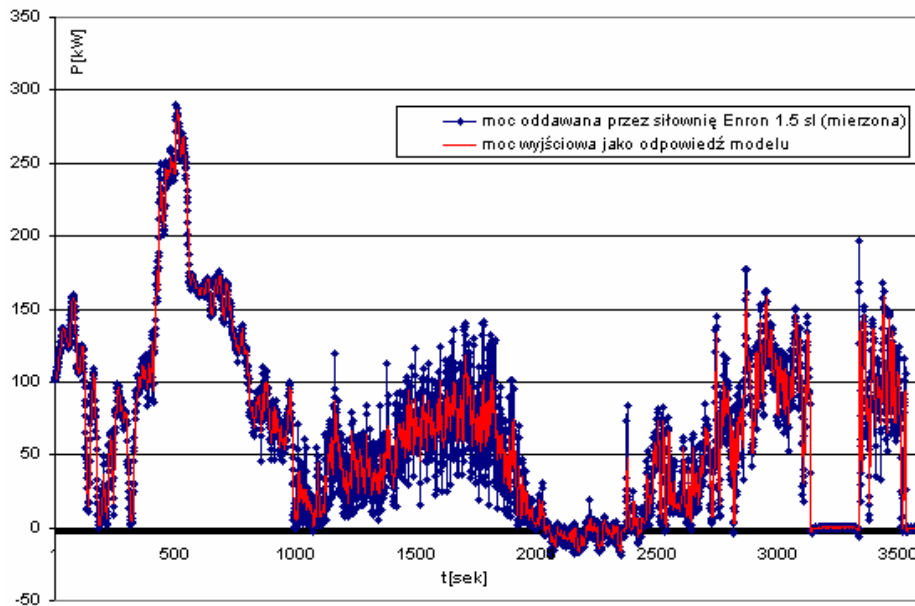
Zastosowanie w sporządzonym modelu matematycznym szeregu uproszczeń oraz ograniczenia narzędzi służących do symulowania określonych zachowań rzeczywistego obiektu, nakazały zachowanie ostrożności i postawienie pytania, czy zaimplementowany model odpowiada cechom rzeczywistej elektrowni wiatrowej? Czy pominięcie własności wielu inercyjnych elementów wykonawczych (np. siłowników obracających rzeczywiste płyty wirnika) pozwala przyjąć, że wykonany model elektrowni można porównać do obiektu rzeczywistego?

Aby m.in. odpowiedzieć na te pytania Autor dokonał pomiaru wielu parametrów na istniejących elektrowniach wiatrowych, które jego zdaniem mogą posłużyć celom porównawczym.

Tym samym, pomiary wykonano na elektrowniach wiatrowych typu Enron 1.5 sl o mocy jednostkowej  $P=1500$  kW. Dokonane pomiary, z czasem próbkowania 1 sekunda, wykonano w horyzoncie 3600 sekund. Na podstawie tych pomiarów Autor wygenerował przebiegi pobudzające opracowany model matematyczny elektrowni wiatrowej.

Efektom tak zadanego wzbudzenia stały się przebiegi mocy generowanej w modelu, które następnie porównano z przebiegiem otrzymanym w obiekcie rzeczywistym.

Tak więc na przykład, na rys. 9 zaznaczono kolorem niebieskim przebieg mocy czynnej wytworzonej w rzeczywistym obiekcie (moc mierzona).



Rys. 9. Porównanie przebiegów mocy wyjściowej obiektu rzeczywistego oraz modelowanego

Na tym samym rysunku, kolorem czerwonym oznaczono przebieg mocy wyjściowej (czynnej), jako sygnału wyjściowego z modelu zaimplementowanego do środowiska pakietu Matlab/Simulink®. W podobny sposób w [5] wykonano kilka innych symulacji.

Przeprowadzone badania oraz uzyskane przebiegi mocy wyjściowej modelu pozwalają zdaniem Autora, na stwierdzenie, iż wykorzystanie doświadczenia i zdobytej wiedzy eksperckiej jako podstawy funkcjonowania metod sztucznej inteligencji, daje możliwość sterowania elektrownią wiatrową z wynikami nie gorszymi od tych, które uzyskuje się w obecnie eksploatowanych elektrowniach wiatrowych. Z uzyskanych efektów badań symulacyjnych wynika nawet, że zastosowanie przyjętej strategii sterowania zamodelowanym układem elektrowni wiatrowej zapewnia wyższą jakość procesów regulacji mocy czynnej w porównaniu z procesami na obiekcie rzeczywistym.

Przyjęta do badań strategia sterowania w sposób naturalny stała się podstawą heurystycznego doboru odpowiednich wartości funkcji przynależności w zastosowanych regulatorach rozmytych. Wykorzystanie heurystycznej metody przeszukiwania umożliwiło dobranie (metodą prób i błędów) krzywych przynależności w regulatorach rozmytych, dając dobre wyniki regulacji. Stwierdzono jednakże, że przy stałych regułach sterowania regulatorów rozmytych występuje wysoka zależność jakości regulacji mocy czynnej od wartości średnich prędkości wiatru.

Aby temu zjawisku zapobiec, należałoby dostosowywać kształt krzywych przynależności zaprojektowanych regulatorów do aktualnych poziomów mocy generowanej

określonymi warunkami średniej prędkości wiatru w stanie ustalonym. Takie postępowanie wymagałoby jednak zbudowania regulatorów rozmytych o zmiennej strukturze o zmiennej strukturze, przełączanej w momentach istotnej zmiany siły wiatru. Zmiany w strukturze regulatorów oznaczałyby ogólne zmiany kształtu krzywych przynależności, zarówno po stronie rozmywania, jak i ostrzenia. Kwestią badań pozostałoby stwierdzenie koniecznej i wystarczającej ilości przełączanych struktur, jak również ewentualnych problemów w stanach przejściowych związanych z ich przełączaniem.

Zamiast tego, Autor zaproponował wprowadzenie do struktury zaprojektowanego układu regulacji możliwości przeskalowania wejść zastosowanych regulatorów rozmytych.

Zmodyfikowana struktura układu regulacji z przeskalowywanymi wejściami regulatorów rozmytych, uzależnionymi od „średnich” prędkości wiatru, znacząco poprawiła jakość procesów regulacji. Przebiegi mocy czynnej, uzyskane dla tej struktury w ramach symulacji, charakteryzowały się w całym zakresie dozwolonych prędkości wiatru wysoką (w porównaniu do przebiegów obserwowanych na obiekcie rzeczywistym) jakością generowanej energii elektrycznej.

Otrzymane wyniki badań stanowią istotne przesłanki do stwierdzenia, że poprzez wykorzystanie w procesie strojenia układu sterowania zasobów wiedzy eksperckiej można określić i narzucić tym układom strategię sterowania, które mogą być skuteczne w występujących trybach pracy regularnej siłowni wiatrowej, zgodnych z np. wymogami rynku bilansującego w Polsce.

## LITERATURA

- [1] Barzyk G., Jarmusz M.: Projekt optymalizacji pracy układu siłowni wiatrowej przy zastosowaniu mikroprocesorowego regulatora wykorzystującego procedurę weryfikacji doboru nastaw, Mat. III Międzynarodowej Konferencji Energetyków, Ustronie 1997,
- [2] Barzyk G., Jarmusz M.: Utilization of methods of control systems active diagnosis for improvement of control quality coefficients, Proceedings of the 2nd ISTC UEES'96, Szczecin-Międzyzdroje 1996,
- [3] Barzyk G.: Construction of wind plant - engineering strategy and technical aspects on the grounds of Nowogard's experience, Proceedings of the 4th ISTC UEES'99, St. Petersburg 1999,
- [4] Barzyk G.: Układ sterowania oraz model siłowni wiatrowej, Mat VIII Forum OZE, Międzybrodzie Żywieckie 2002,
- [5] Barzyk. G. Modelowanie i badania symulacyjne systemu sterowania pracą siłowni wiatrowej, wykorzystującego metody sztucznej inteligencji, Rozprawa doktorska, Szczecin 2004

## UTILIZATION OF ARTIFFICIAL INTELLIGENCE IN A WIND TURBINE MODEL

In a paper, Author based to his Doctor's thesis presented an idea of wind turbine model which use artificial intelligence methods, incl. neural networks and fuzzy logic rules. The described control strategy was checked at wind turbine model with a total power of 1500 kW.

The paper describes a physical nonlinear dynamic model of wind turbine with an induction generator connected to the grid.