

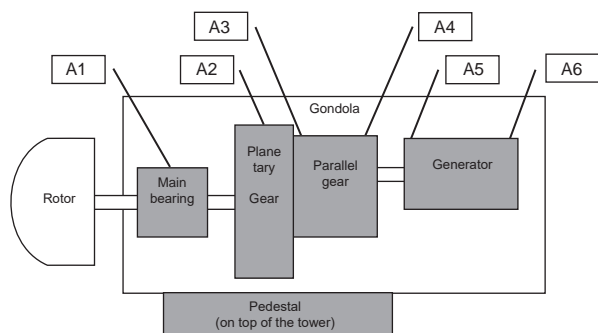
Leszek Kotulski

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Informatyki Stosowanej,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

## System informatyczny nadzoru i sterowania dużej turbiny wiatrowej na przykładzie innovacyjnej turbiny ANew-S1 z pionową osią obrotu

### IT system for monitoring and control of a big wind turbine on the example of innovative vertical axis rotation ANew-S1 turbine

Każda turbina wiatrowa składa się co najmniej z dwóch systemów – mechanicznego i elektroniczno-elektrycznego – por. rysunek 1. W dużym uproszczeniu, system mechaniczny dużej, klasycznej turbiny wiatrowej z poziomą osią obrotu składa się z wirnika, łożyska głównego i co najmniej dwóch przekładni. Do systemu elektrotechnicznego należy generator. Głównym modułem systemu elektronicznego jest falownik. Oczywiście oba systemy są ze sobą połączone.



Rys. 1. Typowy układ mechaniczny dużej turbiny wiatrowej z poziomą osią obrotu, znaczniki A1-A6 oznaczają typowe miejsca monitoringu drganiowego

W nowoczesnych turbinach wiatrowych do dwóch powyższych systemów dochodzi dodatkowo system informatyczny. O ile dwa pierwsze wyspecyfikowane systemy są standardem, o tyle rozbudowany system informatyczny w turbinie wiatrowej

wciąż jest rzadkością. W podręcznikach i monografiach dotyczących turbin wiatrowych w zasadzie się o nim nie wspomina [6,13]. Wiadomo już jednak, że nowoczesna energetyka wiatrowa nie może się rozwijać bez rozwoju i wdrożeń systemów informatycznych jako integralnych składowych turbin, zwłaszcza dużych. Dlatego trwają intensywne prace nad tego typu systemami. W niniejszym artykule omawiana jest ta tematyka.

#### Zadania informatycznego systemu dużej turbiny wiatrowej

System komputerowy dużej turbiny wiatrowej realizuje kilka zadań. Do najważniejszych należą:

- sterowanie na poziomie wyższym niż elektroniczny,
- inteligentny monitoring i wczesne ostrzeżenie,
- zarządzanie danymi, w szczególności ich zbieranie i archiwizacja,
- diagnostyka (oparta na przebiegu monitoringu i zarchiwizowanych danych),
- predykcja warunków pracy turbiny,
- optymalizacja pracy turbiny, co jest ściśle związane ze sterowaniem,
- wspomaganie decyzji związanych z eksploatacją, m.in. planowaniem remontów.

Na najniższym poziomie podstawowe sterowanie turbiną realizowane jest przy pomocy elektroniki programowalnej. Umożliwia ona jednak zakodowanie jedynie bardzo prostych

## System informatyczny turbiny ANew-S1

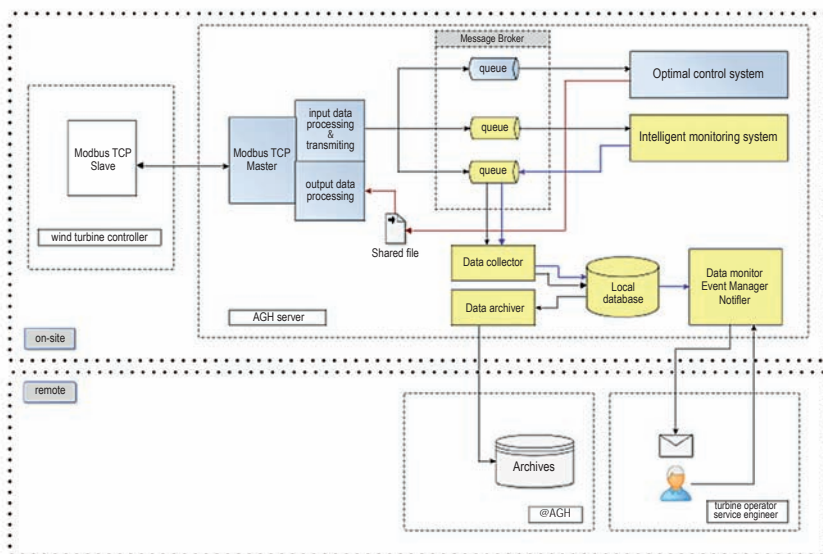
algorytmów. Optymalizacja pracy turbiny, do której niezbędna jest m.in. predykcja warunków jej pracy co najmniej z kilkuno-stosekundowym wyprzedzeniem, może być zapewniona jedynie na poziomie systemu komputerowego. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest m.in. fakt, że w tym wypadku muszą być przetwarzane duże strumienie danych w czasie rzeczywistym. W przypadku turbiny wiatrowej jednym z elementów niezbędnych do optymalizacji pracy turbiny jest predykcja warunków wiatrowych z odpowiednim wyprzedzeniem. Biorąc pod uwagę fakt, że zmienność wiatru ma charakter chaotyczny [1, 3], nie jest to proste zadanie i wymaga algorytmów o dużej złożoności. Wspomniane przetwarzanie danych jest związane z ich odszumianiem i archiwizacją. W związku z tym zarządzanie bazą danych również należy do zadań informatycznego systemu turbiny. Biorąc pod uwagę fakt, że większość danych operacyjnych mierzona jest co sekundę, baza danych bardzo szybko osiąga duże rozmiary, co z punktu widzenia zarządzania taką bazą również generuje pewną specyfikę na poziomie informatycznym [12].

Ważnym zadaniem systemu informatycznego jest inteligentny monitoring turbiny wiatrowej. Jego istotność związana jest przede wszystkim z faktem, że w przypadku dużych turbin wiatrowych naprawy i remonty generują duże koszty. Inteligentny monitoring polega na śledzeniu dynamiki zmian parametrów operacyjnych [2, 5] oraz sygnałów z czujników drganiowych, rozmieszczonych w kluczowych punktach układu mechanicznego – por. rysunek 1 [5-11, 14, 15]. Wykrycie patologicznego stanu pracy turbiny powoduje powiadomienie operatora przez system. Zarchiwizowane w bazie danych informacje o usterkach i awariach są wykorzystywane przez moduł wspomagania decyzji do planowania przeglądów i remontów, zarówno systemu mechanicznego jak i elektrycznego.

Jak już wspomniano, informatyczne systemy dla dużych turbin wiatrowych są na razie w początkowej fazie rozwoju. W związku z tym rzadko można spotkać turbinę z systemem posiadającym wszystkie wyspecyfikowane powyżej funkcjonalności. Niemniej jednak fakt, że stosowanie takich systemów istotnie wpływa na optymalizację pracy turbiny w kilku aspektach powoduje, że trwają intensywne prace nad rozwojem takich systemów.

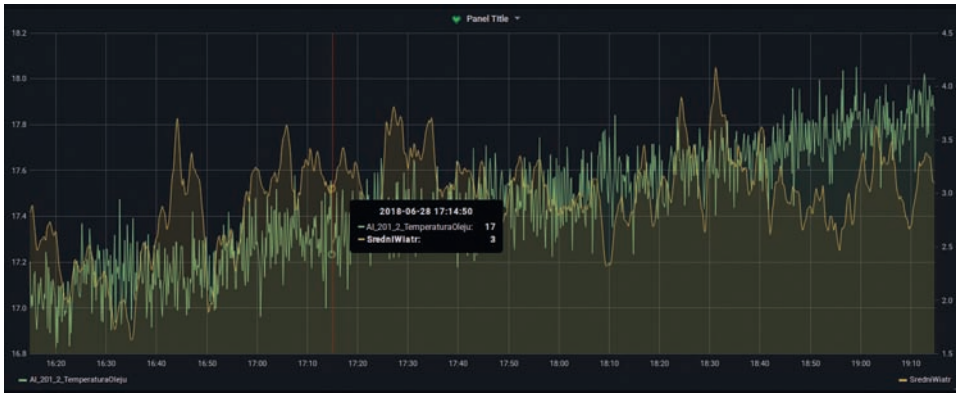
System informatyczny innowacyjnej turbiny wiatrowej z pionową osią obrotu typu ANew-S1 [4, 5] jest przykładem systemu informatycznego dedykowanego dla dużej turbiny wiatrowej. Zarówno sama turbina jak i jej system komputerowy zostały stworzone w ramach grantu NCBiR (Demonstrator – wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej) przez konsorcjum, złożone z firmy *Stalprodukt*, firmy *ANew* oraz Akademii Górniczo-Hutniczej<sup>1)</sup>. Turbina ANew-S1 została zaprojektowana przez firmę *ANew* i wyprodukowana przez *Stalprodukt*. Więcej informacji na jej temat można znaleźć w [4].

Jednym z głównych zadań zespołu naukowego z Akademii Górniczo-Hutniczej było zaprojektowanie, zaimplementowanie i przetestowanie komputerowego systemu turbiny – por. rysunek 2. System składa się z trzech zasadniczych części: modułu inteligentnego monitoringu (*intelligent monitoring system*) [5], modułu optymalizacji pracy turbiny (*optimal control system*) oraz podsystemu archiwizacji danych, składającego się z modułu zbierania danych (*data collector*), bieżącej bazy danych (*local database*), bazy danych (*data archiver*) oraz zewnętrznej hurtowni danych (*archives*). Struktura i ogólna zasada działania systemu inteligentnego monitoringu została opisana w [5]. Przypomnijmy więc tylko krótko, że jest to hybrydowy system sztucznej inteligencji, złożony z rezonansowej sieci neuronowej ART oraz neuronowej sieci radialnej RBF, który w czasie rzeczywistym śledzi dynamikę zmian stanów operacyjnych i sygnałów z czujników drganiowych oraz odnotowuje powstanie nowych skupisk (klastrow), które odpowiadają usterkom i awariom turbiny. System zapewnia wizualizację śledzonych parametrów – na rysunku 3 przedstawiona jest wizualizacja równoczesnego monitoringu dwóch parametrów – temperatury oleju w układzie hydraulicznym hamulca mechanicznego oraz prędkości wiatru. Na początku system uczy się poprawnej pracy turbiny dokonując klasteryzacji jej stanów operacyjnych – bieg jałowy, rozruch, mała moc, średnia moc, duża moc. Poszczególnym klastrom odpowiadającym stanom operacyjnym zostają przypisane kody. Jeśli trajektoria pracy turbiny w przestrzeni śledzonych parametrów wychodzi poza obszary wyznaczone przez klastry odpowiadające prawidłowym stanom operacyjnym turbiny, wygenerowany zostaje nowy klaster i system alarmuje operatora, że dzieje się coś podejrzanego. Informacje o zaistniałej usterce i awarii archiwizowane są w bazie danych, co w przyszłości pozwala na szybką diagnostykę.

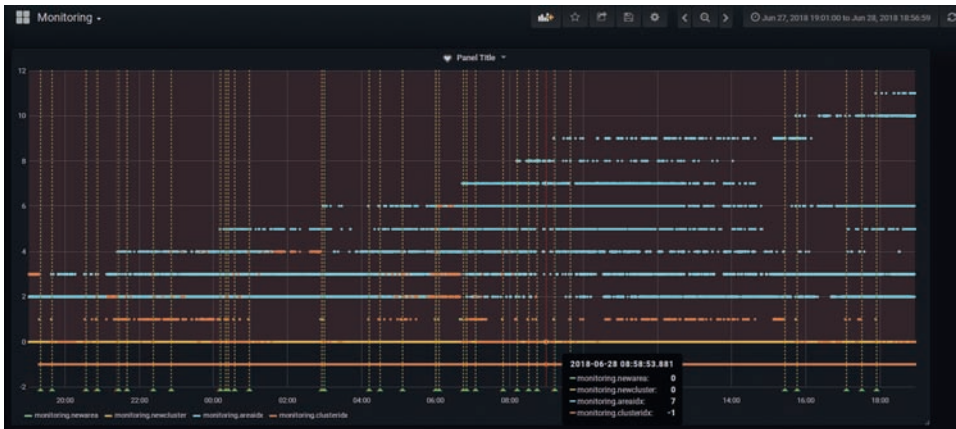


Rys. 2. Schemat układu komputerowego turbiny ANew-S1, zaprojektowanego przez zespół Akademii Górniczo-Hutniczej

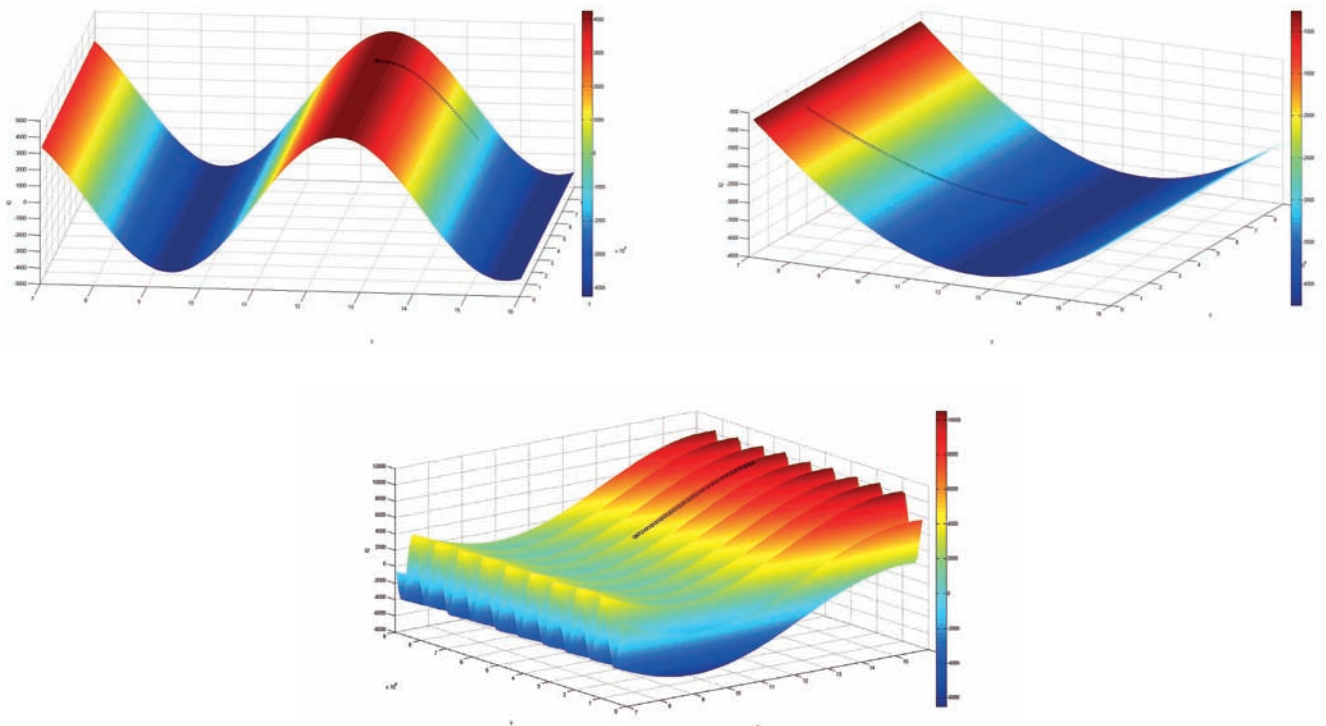
<sup>1)</sup> Grant NCBiR nr WND-DEM-1-153/01: „Innowacyjna elektrownia wiatrowa z pionową osią obrotu, o mocy 1,5 MW wyposażona w układ przekształtnikowy umożliwiający uzyskanie wysokiej efektywności przetwarzania energii wiatru w energię elektryczną przy niskich prędkościach wiatru”.



Rys. 3. Układ inteligentnego monitoringu – równoczesny monitoring różnych parametrów skupisk (klastrow) w wielowymiarowej przestrzeni monitorowanych parametrów (na rysunku przedstawiony jest zrzut ekranu zapewniającego wizualizację monitoringu)



Rys. 4. Układ inteligentnego monitoringu – monitoring stanów operacyjnych turbiny zapewnia wizualizację dynamiki stanów operacyjnych (na rysunku przedstawiony jest zrzut ekranu zapewniającego wizualizację monitoringu)



Rys. 5. System sterowania realizujący zadanie optymalizacji pracy turbiny przy małych prędkościach wiatru (na rysunku wizualizacja zmiany parametrów pracy przy różnych funkcjach testujących w przestrzeni trójwymiarowej)

Drugim zasadniczym modułem systemu jest moduł optymalizacji pracy turbiny. Ma on zapewnić, przy danych warunkach pracy, maksymalizację produkcji energii. Jego działanie jest kluczowe przede wszystkim przy małych prędkościach wiatru, tym bardziej że skonstruowana turbina ma z założenia rozszerzać okno wiatrowe w kierunku niskich prędkości wiatru [4]. Działanie algorytmu opiera się na lokalnych metodach iteracyjnych wynikających z podejścia gradientowego. Generowana moc jest, w danym momencie, traktowana jako funkcja parametrów pracy turbiny. Uwaga o temporalnej lokalności funkcyjnej zależności jest istotna. Ze względu na specyfikę dynamiki turbiny wiatrowej wspomniana zależność funkcyjna nie ma charakteru globalnego. Intuicyjnie oznacza to, że powierzchnia, będąca wykresem tej zależności funkcyjnej – por. rysunek 5 – nie jest stała, tylko faluje. Powoduje to dodatkowe problemy – np. krok zmiany parametrów powinien być zmienny w czasie i dostosowany do lokalnej zmienności wykresu funkcji – dla większej zmienności wykresu krok powinien być mniejszy. Algorytm działa w ten sposób, że będąc w danym punkcie pracy turbiny bada otoczenie tego punktu. Jeśli w którymś z blisko położonych punktów produkowana moc jest większa, to następuje przesunięcie parametrów pracy turbiny do nowego, znalezionego punktu. Z powodu dużej dynamiki zmiany parametrów pracy turbiny wiatrowej proces ma charakter ciągły – parametry pracy turbiny, przede wszystkim z powodu zmienności warunków wiatrowych, cały czas się zmieniają, więc system musi przez cały czas optymalizować pracę turbiny. Testy zostały wykonane dla różnych funkcji i wykazały prawidłowe działanie systemu – punkt pracy systematycznie przesuwa się w kierunku zwiększenia produkcji mocy – por. trajektorie (czarne krzyżki) na rysunku 5. Należy jednak podkreślić, że uzyskane wyniki mają charakter wstępny i niezbędne będą wielomiesięczne testy w różnych warunkach wiatrowych.

Na odrębną uwagę zasługuje fakt uwzględnienia predykcji warunków wiatrowych w algorytmie sterowania turbiną. W sterowaniu dużymi turbinami wiatrowymi istotną rolę odgrywa duża bezwładność układu mechanicznego. Dlatego też do skutecznego sterowania taką turbiną niezbędna jest predykcja warunków wiatrowych w horyzoncie czasowym ok. 30 sekund. Oczywiście predykcja taka musi być dokonywana w czasie rzeczywistym i w trybie ciągłym. W zespole naukowym AGH trwają prace nad takim systemem predykcyjnym w kontekście możliwości wykorzystania go w algorytmie sterowania turbiną ANew-S1. Dotychczasowe wyniki, uzyskane dla systemu bazującego na systemach hybrydowych rozmyto-neuronalno-statystycznych, wskazują na możliwość skutecznej predykcji w horyzoncie 30 sekund.

## Podsumowanie

Opisany system informatyczny turbiny ANew-S1 został już zaimplementowany i wstępnie przetestowany. Na obecnym etapie testy wykazały prawidłową, zgodną z oczekiwaniami pracę systemu. Należy jednak podkreślić, że rozruch turbiny jest obecnie w fazie początkowej – dysponujemy danymi jedynie z kilkunastu godzin pracy turbiny. Testy i modyfikacje systemu muszą potrwać co najmniej rok. Tak długi okres jest wymagany z powodu, między innymi, sezonowości warunków wiatrowych.

- [1] Barszcz T., Bielecka M., Bielecki A., Wójcik M., *Wind speed modelling using Weierstrass function fitted by a genetic algorithm*, "Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics" 2012, 109, 68-78.
- [2] Barszcz T., Bielecki A., Bielecka M., Wójcik M., Włuka M. *Vertical axis wind turbine states classification by a ART-2 neural network with a stereographic projection as a signal normalization* [w:] Chaari et al. – eds., *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations*, series: "Applied Condition Monitoring" 2016, vol. 4, 265-275.
- [3] Bielecka M., Barszcz T., Bielecki A., Wójcik M. (2012), *Fractal modelling of various wind characteristics for application in a cybernetic model of a wind turbine*, "Lecture Notes in Artificial Intelligence" 2012, vol.7268, 531-538.
- [4] Bielecki A., *Duże turbiny wiatrowe z pionową osią obrotu – obiecująca innowacja*, „Energetyka” 2018, nr 6, 276-279.
- [5] Bielecki A. (2018), *Inteligentny monitoring dużych turbin wiatrowych*, „Energetyka” 2018, nr 8, artykuł przyjęty do druku.
- [6] Boczar T., *Energetyka wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania*, Wydawnictwo PAK, Warszawa 2008.
- [7] Hameeda Z., Honga Y.S., Choa T.M., Ahnb S.H., Son C.K., *Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: a review*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 2009, vol.13, 1-39.
- [8] Jabłoński A., Barszcz T., Bielecka M., *Automatic validation of vibration signals in wind farm distributed monitoring systems*, "Measurement" 2011, vol. 44, 1954-1967.
- [9] Kusiak A., Li W., *The prediction and diagnosis of wind turbine faults*, "Renewable Energy" 2011, , vol. 36, 16-23.
- [10] Kusiak A., Zhang Z. (2012), *Control of wind turbine power and vibration with a data-driven approach*, "Renewable Energy" 2012, vol. 43, 73-82.
- [11] Ouyang T., Kusiak A., He, Y., *Predictive model of yaw error in a wind turbine*, „Energy” 2017, vol. 123, 119-130.
- [12] Pelikant A., *Hurtownie danych. Od przetwarzanie analitycznego do raportowania*, Helion, Gliwice 2011.
- [13] Tytko R., *Odnawialne źródła energii*, OWG, Warszawa 2009.
- [14] Verma A., Kusiak A., *Fault monitoring of wind turbine generator brushes: A data-mining approach*, "Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME" 2012, vol. 134(2), 021001.
- [15] Zhang Z., Kusiak A., *Monitoring wind turbine vibration based on SCADA data*, "Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME" 2012, vol. 134(2), 021004.

