

doi:10.15199/48.2023.12.51

Monitorowanie drgań mechanicznych elektrowni wiatrowych o pionowej osi obrotu

Streszczenie. W artykule pokazano system służący do monitorowania drgań mechanicznych pochodzących od elektrowni wiatrowych o pionowej osi obrotu, które mieszczą się na dachu budynku F Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej. Do wyznaczenia charakteru drgań mechanicznych wykorzystano czujniki drgań wraz z obsługującym je mikrokontrolerem ARDIUNO zamontowane na konstrukcjach nośnych turbin wiatrowych na budynku. Oprogramowanie systemu wykonano w środowisku programistycznym C++. Do filtracji sygnałów z czujników drgań zastosowano rekursywny Filtr Kalmana. Opracowane oprogramowanie umożliwia wizualizację, analizę i archiwizację danych pomiarowych.

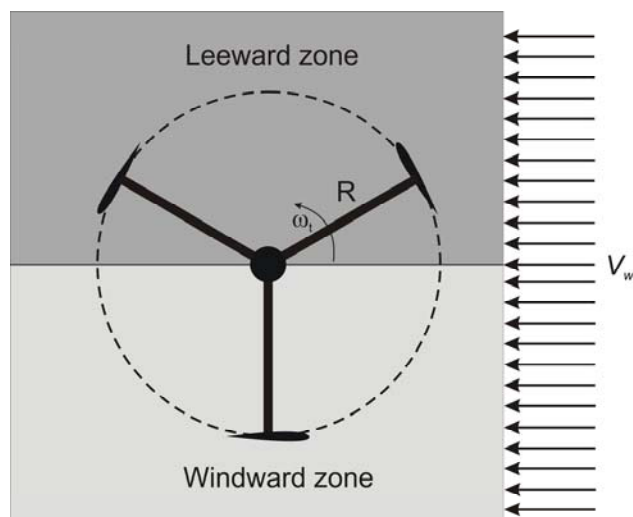
Abstract. The article presents a system for monitoring mechanical vibrations from wind turbines with a vertical axis of rotation, which are located on the roof of the building F of the Faculty of Electrical Engineering of the Czestochowa University of Technology. To determine the nature of mechanical vibrations, vibration sensors were used along with the ARDIUNO microcontroller, mounted on the supporting structures of the wind turbines in the building. The system software was developed in the C++ development environment. A recursive Kalman Filter was used to filter signals from vibration sensors. The developed software enables the visualization, analysis and archiving of measurement data. (**Mechanical Vibration Monitoring of Vertical Axis Wind Turbines**).

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa o pionowej osi obrotu, wirnik H-Darrieus, okresowe uderzenia momentu, Filtr Kalmana

Keywords: vertical axis wind turbine, H-Darrieus rotor, torque periodic bursts, Kalman Filter

Wstęp

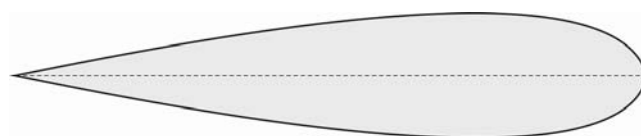
Wirnik typu H-Darrieus jest jedną z wersji turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu. Sprawność przetwarzania energii turbiny osiąga wartości około 30%. Płaty takiego wirnika są proste i pionowe (rys. 3). Przekrój poprzeczny płatów turbiny jest wynikiem symetrycznego złożenia znormalizowanych profili lotniczych według NACA (National Advisory Committee of Aeronautics), co powoduje powstawanie siły nośnej podczas oddziaływania wiatru na lewą, albo prawą stronę płata. Przekrój poziomy turbiny typu H-Darrieus z trzema płatami pokazano na rysunku 1, natomiast przykładowy przekrój płata (profil NACA 0021) na rysunku 2. Właściwości turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu z wirnikiem typu H-Darrieus opisano w [1, 2, 3].



Rys. 1. Przekrój poziomy trójpłatej turbiny typu H-Darrieus

Siła nośna wytwarzająca moment obrotowy turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu powstaje w czasie, kiedy płat turbiny znajduje się w strefie nawietrznej, tj. przekrój płata pozostaje „w natarciu”. Do analizy aerodynamiki wirników typu H-Darrieus wykorzystuje się teorię podwójnej wielokrotnej strugi (model DMS), która została zaproponowana przez Paraschivoiu [4, 5]. Z teorii tej wynika, że w chwili przejścia płata wirnika ze strefy

nawietrznej do zawietrznej i odwrotnie, występuje uderzenie momentu aerodynamicznego na skutek skokowo zmieniającej się siły nośnej płata (skokowy wzrost lub skokowy spadek). Powoduje to oscylacje momentu mechanicznego na wale generatora, a co za tym idzie, oscylacje prędkości obrotowej. Uderzenia momentu aerodynamicznego wywołują drgania konstrukcji, na której posadowiona jest turbina oraz niepożądane efekty dźwiękowe, a także oscylacje wartości generowanej mocy elektrycznej.



Rys. 2. Przekrój płata o podwójnym profilu NACA 0021

Charakterystyka elektrowni wiatrowej

Elektrownia wiatrowa typu MEW-10 składa się z turbiny wiatrowej o osi pionowej (VAWT) z trójpłatowym wirnikiem typu H-Darrieus, wolnoobrotowego tarczowego generatora synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSG) oraz sterownika elektrowni wraz z układami zabezpieczeń. Falownik maszynowy, połączony z generatorem synchronicznym, wymusza moment na wale generatora, dostosowując prędkość obrotową turbiny do aktualnej prędkości wiatru i zapewniając w ten sposób maksymalny współczynnik wykorzystania energii wiatru. Falownik sieciowy łączy generator z siecią elektroenergetyczną, generując trzy przebiegi napięcia, zsynchronizowane z napięciami fazowymi sieci.

Tabela 1. Charakterystyka elektrowni wiatrowej MEW-10

V_w (m/s)	P (W)	rpm	V_w (m/s)	P (W)	rpm
2	0.0	19	9	4213	103
3	110	31	10	5797	115
4	327	43	11	7732	129
5	683	55	12	10000	139
6	1215	67	13	10000	138
7	1957	79	14	10000	134
8	2945	91	15	10000	129

Moc znamionowa uzyskiwana przy prędkości wiatru 12 m/s wynosi 10 kW. Jeżeli prędkość wiatru przekracza tę wartość, moc jest ograniczana przez układ sterowania [6]. Maksymalna prędkość obrotowa wirnika wynosi około 140 obr/min. Charakterystykę MEW-10, uzyskaną empirycznie, przedstawiono w tabeli 1.

Powierzchnia przekroju wirnika (koła wiatrowego) wynosi 30 m² - wysokość płatów 6 m, średnica wirnika 5 m. Przekrój poprzeczny płata wirnika stanowi symetryczne złożenie standardowych przekrojów lotniczych NACA 0021. Widok turbiny wiatrowej typu MEW-10 na konstrukcji nośnej pokazano na rysunku 3, natomiast widok pojedynczego płata wirnika na rysunku 4.



Rys. 3. Widok turbiny wiatrowej MEW-10



Rys. 4. Widok pojedynczego płata turbiny wiatrowej

Opis systemu monitorowania drgań

Zjawiska fizyczne, powtarzane w określony sposób, są w stanie uszkodzić konstrukcję budynku. Wspólnym mianownikiem dla tego typu zagrożeń są drgania. Dlatego ważnym aspektem projektowania konstrukcji budowlanych jest prawidłowa ocena wpływu drgań na budynek oraz dobór odpowiedniej technologii zabezpieczeń w celu zminimalizowania niepożądanych efektów wywoływanych drganiami mechanicznymi. Znacznie poważniejszym problemem jest wywołanie drgań mechanicznych poprzez wprowadzenie zmian konstrukcyjnych w procesie modernizacji technicznej obiektu, który pierwotnie nie był zaprojektowany do przenoszenia dodatkowych obciążeń mechanicznych. Tego typu problem stanowią elektrownie wiatrowe o pionowej osi obrotu zainstalowane na dachu

budynku F Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej [7]. W związku z powyższym, wdrożono system umożliwiający monitorowanie oraz analizę drgań mechanicznych powstających w trakcie pracy elektrowni wiatrowych. Uzyskane wyniki posłużą do opracowania układu sterowania elektrowniami wiatrowymi z algorytmem tłumienia okresowych uderzeń momentu aerodynamicznego opartym na teorii sterowania powtarzalnego (repetitive control).

W układzie pomiarowym zastosowano cztery czujniki vibracji z membraną piezoelektryczną, która jest wrażliwa na działanie sił mechanicznych. Membrana ta generuje sygnał elektryczny, proporcjonalny do wielkości siły mechanicznej. Czujniki zostały umieszczone w obudowach z tworzywa sztucznego i przymocowane do elementów konstrukcji nośnych elektrowni wiatrowych. Widok czujnika drgań pokazano na rysunku 5, natomiast sposób zamontowania membrany piezoelektrycznej czujnika w obudowie pokazano na rysunku 6.



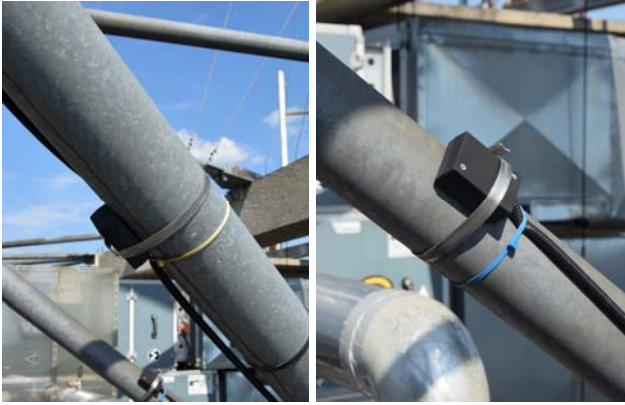
Rys. 5. Widok wybranego czujnika drgań [7]



Rys. 6. Widok membrany czujnika drgań w obudowie [7]

Jako położenie dwóch czujników wybrano punkty środkowe konstrukcji, gdzie występują największe amplitudy drgań. Trzeci czujnik, dla porównania wskazań, umieszczono na początku ramienia konstrukcji nośnej jednej z turbin, natomiast czwarty czujnik, jako referencyjny, umieszczono na niewykorzystanej konstrukcji wsporczej. Dodatkowo, do systemu dodano czujniki temperatury i wilgotności. Rozmieszczenie czujników drgań na konstrukcjach wsporczych elektrowni wiatrowych pokazano na rysunkach 7 i 8.

Podstawę układu pomiarowego stanowi hybrydowa jednostka centralna z mikrokontrolerem Arduino Uno R3 oraz wyświetlaczem. Jednostka centralna została osadzona w hermetycznej obudowie (rys. 9), którą umieszczono w istniejącej klimatyzowanej szafie elektrycznej na dachu budynku. Urządzenie Arduino UNO odczytuje w czasie rzeczywistym dane z czujników drgań.



Rys. 7. Rozmieszczenie czujników drgań na środku ramion konstrukcji wsporczej elektrowni wiatrowych



Rys. 8. Rozmieszczenie czujników drgań: na początku ramienia konstrukcji oraz czujnika referencyjnego na niewykorzystanej konstrukcji wsporczej elektrowni wiatrowych



Rys. 6. Widok jednostki centralnej z mikrokontrolerem Arduino Uno R3 wraz wyświetlaczem w hermetycznej obudowie

Platforma programowa Arduino wykorzystuje ogólnie dostępne biblioteki programowe w ramach projektu Open Hardware napisane w języku C/C++. Dostęp do możliwości platformy uzyskuje się poprzez środowisko programowe Arduino IDE.

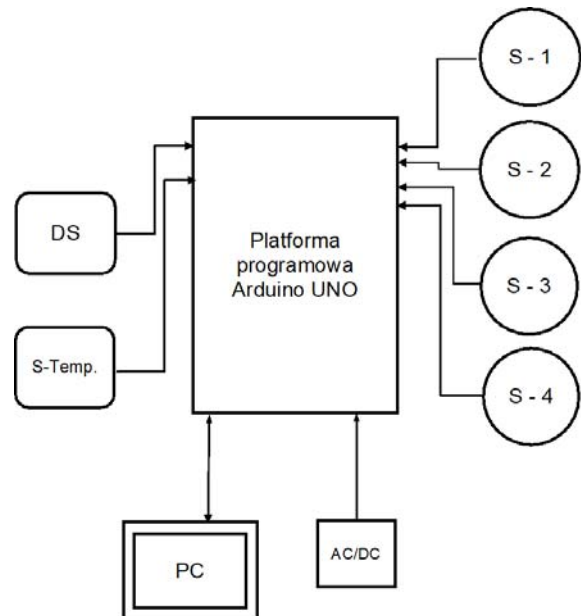
Mikrokontroler Arduino UNO komunikuje się z komputerem PC za pośrednictwem interfejsu UART. Do komunikacji zastosowano wzmacniacz USB – LAN i wykorzystano kabel teleinformatyczny UTP, dzięki czemu możliwa jest transmisja danych do 50 metrów.

Projekt układu do monitorowania drgań mechanicznych bazuje na analogowych czujnikach drgań, które umożliwiają wygenerowanie sygnałów o zmiennej amplitudzie. Do celów

porównawczych, zastosowano również cyfrowy czujnik pochyleń/wstrząsu, który reaguje na zmianę położenia. Jeśli drgania konstrukcji będą na tyle duże, że będą miały wpływ na pracę platformy Arduino, czujnik przedstawi to w postaci sygnału 0 lub 1 [7].

Ponieważ wybrane do układu czujniki drgań z membraną piezoelektryczną są wrażliwe na zmiany temperatury otoczenia, wyposażono system monitorowania drgań w czujnik temperatury i wilgotności, który w czasie rzeczywistym przesyła komunikaty o wszelkich zmianach tych parametrów.

Poprzez interfejs szeregowy dane z platformy Arduino w postaci cyfrowej są przesyłane do komputera PC. Aby uzyskać graficzne przedstawienie przebiegów z danego czujnika, należy skopiować otrzymane wcześniej wartości liczbowe do programu Microsoft Excel i wygenerować z nich wykresy (przebiegi). Schemat blokowy systemu monitorowania drgań pokazano na rysunku 10, gdzie: S-1, S-2, S-3, S-4 – analogowe czujniki drgań, DS – cyfrowy czujnik drgań, S-Temp. – czujnik temperatury i wilgotności, AC/DC – zasilacz impulsowy, PC – komputer [7].



Rys. 10. Schemat blokowy systemu monitorowania drgań [7]

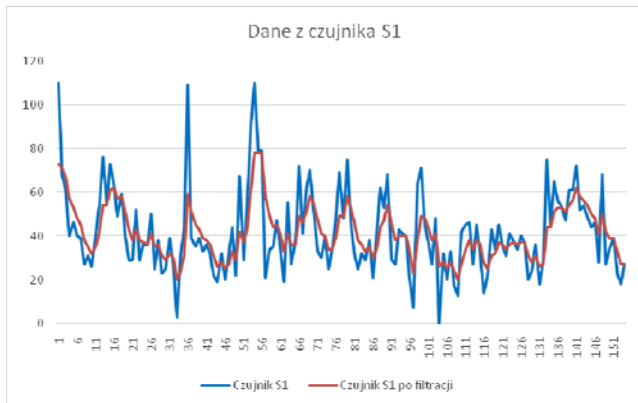
Odczyt i filtracja danych z czujników pomiarowych

W celu wydzielenia sygnału związanego z drganiami pochodzącymi od skokowych zmian siły nośnej płatów turbiny wiatrowej od szumu pomiarowego, jaki wprowadzany jest przez środowisko zewnętrzne (drgania od przejeżdżających tramwajów i innych pojazdów, drgania pochodzące od ruchu windy w budynku, itp.), zastosowano rekursywny Filtr Kalmana.

Odczytane przez platformę Arduino dane z czujników drgań przesyłane są przez port szeregowy do komputera PC, co umożliwi następnie tworzenie wykresów (przebiegów) w środowisku Excel. Po otwarciu interfejsu monitora portu szeregowego można zaobserwować wartości odczytane z czujników drgań w postaci liczbowej. Aby uzyskać graficzne przedstawienie przebiegu drgań z danego czujnika, należy skopiować otrzymane wcześniej wartości liczbowe do programu Microsoft Excel i wygenerować z nich wykresy (przebiegi).

W celu przeprowadzenia filtracji danych należy wprowadzić nazwę pliku wejściowego. Warto zaznaczyć, że plik ten musi zostać zapisany jako plik tekstowy (*.txt)

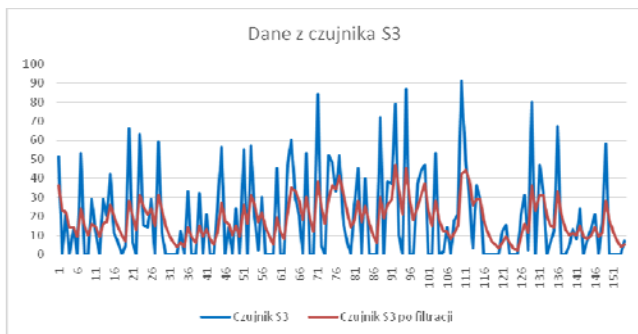
osobno dla każdego czujnika drgań. Najlepiej, aby pliki te zostały umieszczone w tej samej lokalizacji co program wyjściowy. Przed uruchomieniem kompilacji należy wprowadzić wartości elementów macierzy kowariancji Filtru Kalmana. Ostatnim krokiem jest podanie nazwy pliku wyjściowego. Program generuje plik tekstowy z przefiltrowanymi danymi, które można następnie przenieść do programu Excel i wygenerować przebiegi danych przed i po filtracji.



Rys. 11. Przykładowe przebiegi drgań z czujnika S1 przed i po filtracji Kalmana



Rys. 12. Przykładowe przebiegi drgań z czujnika S2 przed i po filtracji Kalmana



Rys. 13. Przykładowe przebiegi drgań z czujnika S3 przed i po filtracji Kalmana

Na rysunkach 11, 12 i 13 pokazano przykładowe przebiegi drgań konstrukcji, wygenerowane z czujników S1, S2 i S3, przed i po filtracji Kalmana.

Całość oprogramowania systemu, tj. program obsługi mikrokontrolera Arduino wraz z odczytem danych z czujników, program interfejsu monitora portu szeregowego oraz filtrację Kalmana zrealizowano w języku C++.

Wnioski

W artykule przedstawiono system do monitorowania drgań mechanicznych pochodzących od turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu związanych z właściwościami aerodynamicznymi wirnika typu H-Darrieus. Do pomiaru drgań mechanicznych wykorzystano piezoelektryczne czujniki drgań wraz z obsługującym je mikrokontrolerem ARDIUNO zamontowane na konstrukcjach nośnych turbin wiatrowych. Do wydzielenia pożądanych sygnałów od szumów pochodzących z otoczenia zewnętrznego posłużono się Filtrami Kalmana, który poprzez odpowiedni dobór elementów macierzy kowariancji, umożliwia filtrację uzyskanych surowych danych z czujników drgań. Uzyskane wyniki posłużą do opracowania układu sterowania elektrowniami wiatrowymi z algorytmem tłumienia okresowych uderzeń momentu aerodynamicznego opartym na teorii sterowania powtarzalnego (repetitive control).

Autorzy:

inż. Krzysztof Ciura, e-mail: krzysztof.ciura@pcz.pl,
dr inż. Andrzej Jąderko, e-mail: andrzej.jaderko@pcz.pl,
Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny,
Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa
mgr inż. Luiza Rakowska, e-mail: luiza.rakowska@pcz.pl,
Politechnika Częstochowska, Szkoła Doktorska,
ul. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa

LITERATURA

- [1] Willy T., Tjukup M., Sohif M., Mohd H. R., Kamaruzzaman S., Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations, *Renewable Energy*, 75 (2015), 50-67
- [2] Xin J., Gaoyuan Z., KeJun G., Wenbin J., Darrieus vertical axis wind turbine: Basic research methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 (2015) 212–225
- [3] Aykut O. O., Serhat Y., Effects of wind gusts on a vertical axis wind turbine with high solidity, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 162 (2017), 1–11
- [4] Paraschivoiu I., Wind Turbine Design – With Emphasis on Darrieus Concept, *Presses Internationales Polytechnique*, Canada (2002)
- [5] Mazur D., Szczerba Z., Badania wstępne turbiny wiatrowej w konfiguracji pionowej w tunelu aerodynamicznym oraz obliczenia przy użyciu metody DMS, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 1, 175-178
- [6] Turbina wiatrowa MEW-10, opis techniczny
- [7] Górski A., Monitorowanie drgań mechanicznych z wykorzystaniem platformy Arduino, *Praca dyplomowa inżynierska*, Częstochowa, 2018