

Problemy zmęczenia materiału w siłowniach wiatrowych

Andrzej Leski¹, Jerzy Małachowski¹, Krzysztof Damaziak¹

¹Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna
email: andrzej.leski@wat.edu.pl, jerzy.malachowski@wat.edu.pl, krzysztof.damaziak@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: W artykule zasygnalizowano problemy związane z analizą trwałości siłowni wiatrowych. Przedstawiono czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową oraz potencjalne zagrożenia. Wymieniono rodzaje analiz trwałości i opisano jedno z nowocześniejszych sposobów analizy – analizę w dziedzinie częstotliwości z wykorzystaniem wzoru Dirlika do określenia liczby cykli.

SŁOWA KLUCZOWE: siłownie wiatrowe, zmęczenie materiału, analiza spektralna

1. Wstęp

Ostatnie lata to dynamiczny rozwój elektrowni wiatrowych. Wiatraki znajdują się blisko miejsc dostępnych dla ludzi. Nie wyznacza się stref ochronnych w pobliżu wiatraków gdzie zabroniony jest wstęp ludzi. Dlatego elektrownie wiatrowe powinny być bezpieczne dla otoczenia. Największe zagrożenie stwarza dezintegracja struktury wiatraka. Urwanie łopaty, urwanie wirnika czy złamanie masztu może stanowić poza stratami materialnymi duże zagrożenie dla otoczenia [1].

Jedną z potencjalnych przyczyn awarii elektrowni wiatrowych jest zmęczenie materiału. Prawdopodobnie zaprojektowane konstrukcje powinny być odporne na zmęczenie materiału tzn. w czasie planowanej eksploatacji turbiny nie powinno dojść do uszkodzenia zmęczeniowego. Dlatego prawdopodobnie zaprojektowane urządzenie musi zostać sprawdzone pod kątem potencjalnego uszkodzenia zmęczeniowego.

2. Czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową elektrowni wiatrowych

Zjawisko zmęczenia materiału polega na degradacji (uszkodzeniu) materiału, który poddany jest działaniu zmiennych obciążeń rozciągających lub ścinających. Źródłem potencjalnych uszkodzeń zmęczeniowych w elektrowniach wiatrowych jest w głównej mierze zmienna prędkość wiatru. Zmiana prędkości wiatru wpływa na zmianę obciążenia łopat wirnika oraz zmianę prędkości obrotowej wirnika. W efekcie zmienia się wartość siły odśrodkowej wszystkich wirujących elementów. Zmiana prędkości wiatru wywołuje także zmienne naprężenie elementów konstrukcyjnych masztu [2-4].

Analizę trwałości zmęczeniowej można przeprowadzić kilkoma sposobami. Najbardziej popularne opisy zjawiska to:

- Opis propagacji uszkodzenia (pęknięcia) od wielkości charakterystycznej dla materiału do wielkości powodującej uszkodzenie katastroficzne w analizowanej konstrukcji.
- Opis kumulowania tzw. uszkodzenia zmęczeniowego [D – ang. Damage] w konstrukcji. Wartość $D=0$ oznacza brak uszkodzenia zmęczeniowego, wartość $D=1$ odpowiada zniszczeniu konstrukcji. Warto podkreślić że dla $0 < D < 1$ w konstrukcji najczęściej nie występuje fizyczne uszkodzenie, które może być wykryte przy pomocy badań nieniszczących.

W przypadku materiałów kompozytowych, a z takich materiałów zbudowana jest większość łopat elektrowni wiatrowych, lepszym wydaje się drugie podejście tzn. w oparciu o współczynnik uszkodzenia zmęczeniowego. Opis propagacji pęknięcia jest stosunkowo dobrze rozpoznany w odniesieniu do metali (stale, stopy aluminium, stopy tytanu). W przypadku kompozytów rzadko mamy do czynienia z klasycznym pękaniem. Uszkodzenie kompozytu charakteryzuje się dużo bardziej złożoną formą. Można wyróżnić różne etapy niszczenia kompozytu np. pęknięcie osnowy, delaminacja, pęknięcie włókien wzmocnienia, itp. W wielu przypadkach określenie długości pęknięcia jest problematyczne lub niemożliwe.

Podejście z wykorzystaniem współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego pomija opis procesu destrukcji konstrukcji. Poszukiwana jest odpowiedź kiedy konstrukcja przestanie być zdolna do przeniesienia działających na nią obciążeń, co w wielu wypadkach jest odpowiedzią wystarczającą. Jednym z zasadniczych problemów jest informacja o wpływie amplitudy cykli obciążenia na trwałość tzw. krzywej S-N. Krzywe S-N wyznacza się na podstawie badań zmęczeniowych. Badania zmęczeniowe przeprowadza się dla materiałów i ich połączeń. W przypadku złożonych konstrukcji konieczne jest ich badanie w całości (pełnoskalowa próba zmęczeniowa). Ze względu na koszt takich badań ich wyniki nie są publikowane.

Generalną zasadą jest zależność trwałości zmęczeniowej od amplitudy cykli naprężenia w konstrukcji. Dla cykli o mniejszej amplitudzie trwałość zmęczeniowa rośnie wykładniczo.

$$N = kS^{-b} \quad (1)$$

Gdzie:

N – liczba cykli do zniszczenia,

S – amplituda cykli zmian naprężenia,

k, b – stałe.

Chcąc zapewnić wystarczającą trwałość zmęczeniową należy tak zaprojektować konstrukcję aby amplituda zmian naprężeń była jak najmniejsza. Warto jednak pamiętać, że w trakcie eksploatacji siłowni wiatrowej może dojść do sytuacji, gdy poziom naprężeń zmiennych wzrośnie w wyniku czego zacznie się kumulować uszkodzenie zmęczeniowe w konstrukcji. Przyczyną może być np. korozja. Powstanie wżerów korozyjnych wywołuje zjawisko karbu w wyniku czego lokalny poziom naprężeń może wzrosnąć kilkukrotnie. Inny problem to uszkodzenia od impaktów. Elementy kompozytowe narażone są na uszkodzenia spowodowane uderzeniami przez inne obiekty.

W przypadku łopat elektrowni wiatrowych może dojść do zderzeń z ptakami, przedmiotami unoszonymi przez wiatr, modelami latającymi oraz gradem. Pomimo, że takie zderzenia nie muszą powodować widocznych skutków to w przypadku kompozytów bardzo prawdopodobne jest powstanie uszkodzeń mogących w znacznym stopniu przyspieszyć powstanie uszkodzenia zmęczeniowego.

3. Algorytm analizy trwałości turbiny wiatrowej w dziedzinie częstotliwości

Analizując trwałość elementów ruchomych należy brać pod uwagę dynamiczne zachowanie się konstrukcji jeśli spełniony jest warunek:

$$f_l < \frac{1}{3} f_{n1} \quad (2)$$

gdzie:

f_l – najwyższa częstotliwość siły wymuszającej

f_{n1} – 1-sza częstotliwość drgań własnych konstrukcji.

Klasyczna analiza układu w dziedzinie częstotliwości jest kosztowna numerycznie ze względu na konieczność symulowania odpowiedzi konstrukcji na długie sekwencje obciążenia. W przypadku analizy elektrowni wiatrowych coraz większą popularność zdobywa analiza w dziedzinie częstotliwości, która może być znacznie efektywniejsza.

Często dużo łatwiej jest uzyskać gęstość widmową (PSD – *Power Spectral Density*) naprężenia niż jego przebieg czasowy w krytycznym elemencie konstrukcji.

Dzięki transformacji Fouriera można wyznaczyć ekwiwalentną reprezentację sygnału obciążenia w dziedzinie częstotliwości:

$$\tilde{y}(f_n) = \frac{T}{N} \sum_k y(f_k) e^{-i(\frac{2\pi n}{N})k} \quad (3)$$

Gęstość widmowa sygnału nie umożliwia odtworzenia pierwotnego sygnału w dziedzinie czasu ale zawiera informacje o częstotliwości występowania cykli obciążenia o określonej amplitudzie. Jeżeli analiza trwałości prowadzona jest z wykorzystaniem hipotezy liniowej kumulacji uszkodzeń (Palmgren-Minera) to kolejność występowania cykli obciążenia nie ma wpływu na uszkodzenie zmęczeniowe.

Zakładając, że znana jest postać gęstości widmowej naprężenia $G(f)$, można obliczyć wskaźniki zwane momentami według zależności [5-6]:

$$m_n = \int_0^\infty f^n G(f) df \quad (4)$$

gdzie:

m_n – moment n-tego stopnia

Za pomocą wartości momentów można wyznaczyć:

$$\text{Wartość średnią (RMS): } RMS = \sqrt{m_0} \quad (5)$$

Liczbę przejść przez zero dla zbież narastających $E[0]$

$$E[0] = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (6)$$

Liczbę maksimów (cykli) na sekundę $E[P]$

$$E[P] = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad (7)$$

Do policzenia uszkodzenia zmęczeniowego należy wyznaczyć liczbę cykli o magnitudzie S oczekiwanych

w czasie T sekund. Nie istnieje w tym przypadku znane rozwiązanie ściśle tego zagadnienia. Z pośród kilku propozycji najlepsze rezultaty można uzyskać stosując rozwiązanie zaproponowane przez Dirlika. Liczba cykli jest wyznaczana z zależności [5-6]:

$$N(S) = E[P] T p(S) \quad (8)$$

Gdzie $p(S)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa wyznaczana z zależności:

$$p(S) = \frac{\frac{D_1 e^{-\frac{z}{Q}} + D_2 z}{R^2} e^{-\frac{z}{2R^2}} + D_3 e^{-\frac{z^2}{2}}}{2\sqrt{m_2}} \quad (9)$$

$$x_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}, \quad \gamma = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}}, \quad D_1 = \frac{2(x_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2},$$

$$R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}, \quad Z = \frac{S}{2\sqrt{m_0}}, \quad D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}{1 - R},$$

$$D_3 = 1 - D_1 - D_2, \quad Q = \frac{1.25(\gamma - D_3 - D_2 R)}{D_1}$$

Dalsza część analizy zmęczeniowej odbywa się w sposób klasyczny z wykorzystaniem krzywej S-N.

4. Zakończenie

Przeprowadzenie analizy trwałości siłowni wiatrowej powinno być niezbędnym warunkiem przed jej dopuszczeniem do eksploatacji. Głównym czynnikiem wywołującym zmęczenie materiału w siłowni wiatrowej są zmiany prędkości wiatru. Analiza trwałości w dziedzinie częstotliwości jest bardziej efektywna obliczeniowo niż analiza w dziedzinie czasu. Oba rodzaje analiz są ekwiwalentne tzn. dają bardzo zbliżone wyniki (nie identyczne) [6]. Podstawą analizy trwałości w obydwu przypadkach jest krzywa S-N [7]. W przypadku elementów kompozytowych praktycznie nie można skorzystać z dostępnych w literaturze krzywych S-N ponieważ zależą one od wielu czynników np. właściwości materiałów składowych i ich ułożenia, technologii wytwarzania, gabarytów i kształtu konstrukcji.

Praca została wykonana w ramach projektu Nr N N500 010040, finansowanego przez MNiSW.

Literatura

- [1] Pojmański G. *Opinia dotycząca zagrożeń związanych z eksploatacją i awariami turbin wiatrowych*. <http://daa.pl/3rU>
- [2] Epaarachchia J. A., Clausen P. D. *The development of a fatigue loading spectrum for small wind turbine blades*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 94 (2006) 207–223
- [3] Apt J. *The spectrum of power from wind turbines*. Journal of Power Sources 169 (2007) 369–374
- [4] Kong C., Bang J., Sugiyama Y. *Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life*, Energy 30 (2005) 2101–2114
- [5] Bishop NWM, Zhihua H. *The fatigue analysis of wind turbine blades using frequency domain techniques*. Amsterdam EWEC'91 1991.
- [6] Rahman M. M., Ariffin A. K., Jamaludin N., Haron C. H. C., Bakar R. *Fatigue Life Prediction of Two-Stroke Free Piston Engine Mounting Using Frequency Response Approach*, Journal of Composite Materials, Vol. 20, No. 4, pp. 322–334, 1986. European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.22 No.4 (2008), pp.480-493
- Halfpenny A. *Dynamic Analysis of Both On and Offshore Wind Turbines in the Frequency Domain*. PhD dissertation. University College London 1998