

POLITECHNIKA OPOLSKA  
WYDZIAŁ MECHANICZNY



**POLITECHNIKA**  
OPOLSKA

# Trwałość elementów turbiny wiatrowej VAWT

**STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Opole 31-10-2023

**mgr inż. Wojciech GANCARSKI**

*Promotor: prof. dr hab. inż. Adam NIEŚLONY*

*Promotor pomocniczy: dr inż. Stanisław ANWEILER*

## 1 WSTĘP

Problematyka trwałości turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu Vertical Axis Wind Turbine pojawia się w literaturze technicznej i badaniach już na początków lat 80-tych XX wieku [11]. Ponieważ jednym z największych i najdroższych ich elementów są łopaty, prace dotyczyły głównie znalezienia kompromisu pomiędzy, trwałością a wydajnością turbin. Obecnie normy regulujące budowę turbin wiatrowych [5] i [6], dedykowane są raczej dla konstrukcji o poziomej osi obrotu Horizontal Axis Wind Turbine. Pokazują badania [7] wykazują, że wspomniane normy IEC nie są wystarczające dla VAWT w kwestii wyznaczania ich trwałości. Jest to spowodowane zupełnie inną budową, a co za tym idzie sposobem ich pracy, obciążeniem wiatrem oraz powstającymi w elementach ustroju nośnego naprężeniach.

Do chwili obecnej powstało wiele nowych konstrukcji turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu lub modyfikacji już istniejących, na ogół do zastosowania na otwartych przestrzeniach w celu maksymalnego wykorzystania ich wydajności. Preferuje to raczej duże kilkunastometrowej wysokości turbiny jak przedstawiono w literaturze [1] [8]. Energetyka wiatrowa coraz częściej wkracza do obszarów miejskich [10], co spowodowane jest chęcią uzyskania między innymi większej autonomii energetycznej. Optymalnymi miejscami ich montażu wydają się być ciągi głównych ulic czy dachy budynków. Ten kierunek preferuje raczej niewielkie urządzenia o pionowej osi obrotu. Przyczyn jest kilka: niewrażliwość na kierunek wiatru, lepsza reakcja na podmuchy pionowe, cichsza praca oraz mniejsza masa.

Jedną z takich konstrukcji jest turbina karuzelowa, zaprojektowana, zbudowana i badana w ramach prac magisterskich [3] [4]. W odróżnieniu od istniejących rozwiązań Savoniusa [9] i Darrieusa [2], posiada charakterystyczne zakończenia łopat, które powinny zwiększać ich efektywność oraz większą wrażliwość na podmuchy pionowe.

## 2 PRZEGLĄD LITERATURY

W niniejszym rozdziale porównano turbin o pionowej osi (VAWT) i turbin o poziomej osi o obrotu (HAWT), z uwzględnieniem ich wydajności w zróżnicowanych warunkach wiatru. Wyniki wskazują, że VAWT okazują się bardziej efektywne w warunkach o wyższych prędkościach wiatru i większej turbulencji, dzięki swojej konstrukcji niezależnej od kierunku wiatru.

Przedstawiono i omówiono podstawowe rodzaje turbin VAWT, takie jak

modele Savoniusa, Darrieusa i karuzelowe, podkreślając wspólne kluczowe komponenty tych turbin oraz unikalne cechy i możliwości zastosowania turbin karuzelowych w środowiskach miejskich.

Przedstawiono analizę czynników wpływających na funkcjonowanie turbin w warunkach miejskiej eksploatacji, zwracając uwagę na złożoność i zmienność tych warunków. Wskazano konieczność dokładnego wyboru lokalizacji turbin wiatrowych, które są odpowiednio wystawione na działanie wiatru, aby zapewnić im maksymalną wydajność.

Zawarto przegląd literatury związany z metodami określania trwałości zmęczeniowej turbin wiatrowych i ich komponentów. Opisano uproszczone metody oceny obciążeń (SLM) w kontekście różnych norm IEC 61400, uwzględniając różnice między małymi a dużymi turbinami. Przedstawiono metody wyznaczania obciążeń w dziedzinie czasu i częstotliwości, podkreślając znaczenie zrównoważonego podejścia do projektowania turbin w celu maksymalizacji ich trwałości i efektywności energetycznej.

Dokonano przeglądu publikacji związanych z badaniami eksperymentalnymi przeprowadzanymi na stanowiskach testowych i w tunelach aerodynamicznych, a także symulacjami aeroelastycznymi, które pozwalają na określenie sił i naprężeń w ustroju nośnym turbin, niezbędnych do oceny ich trwałości.

### **3 CEL, ZAKRES I TEZA PRACY**

#### **3.1 Cel pracy**

Opracowanie algorytmu wyznaczania trwałości elementów turbiny wiatrowej VAWT do zastosowania w warunkach miejskich.

#### **3.2 Zakres pracy**

Zakres pracy obejmuje :

- Badania literaturowe w zakresie wyznaczania trwałości elementów turbiny wiatrowej VAWT;
- Adaptację znanych metod obliczeniowych oraz symulacyjnych;
- Badania eksperymentalne;
- Badania symulacyjne;

### 3.3 Teza pracy

Istnieje możliwość opracowania algorytmu wyznaczania wartości sił, naprężeń oraz trwałości w elementach nowej konstrukcji turbin wiatrowych VAWT stosując znane metody analityczne i aeroelastyczne wspomagane obliczeniami MES.

## 4 BADANIA EKSPERYMENTALNE

Przedmiotem niniejszych badań jest turbina wiatrowa o pionowej osi obrotu oraz eksperymentalnym kształcie łopat. W ramach tych badań przeprowadzono planowanie, budowę stanowiska oraz realizację eksperymentów dotyczących kształtu łopaty. W tym rozdziale przedstawiamy opis stanowiska pomiarowego oraz wyniki badań własnych, które stanowią część szerszych badań nad różnymi kształtami łopat, jakie zostano zaprezentowane w ramach rozprawy doktorskiej pana Waldemara Fedaka. Przeprowadzone badania obejmują zakres prędkości strugi powietrza od 5 do 15 m/s, co jest zgodne z większością podobnych badań, oraz zakresem pracy najczęściej stosowanych generatorów.

Pomiary sił oddziałujących na powierzchnie badanej łopaty przeprowadzono przy użyciu stanowiska pomiarowego składającego się z tunelu aerodynamicznego, mechanizmu obracającego łopatę wokół własnej osi oraz układu pomiarowego. Badany profil łopaty został przymocowany do osi w postaci pręta o średnicy 8 mm. Średnica pręta została dobrana w taki sposób, aby zminimalizować błąd pomiarowy pochodzący od systemu mocowania. Dolna część osi jest umocowana w specjalnym łożysku przegubowym, co pozwala na swobodny obrót wokół własnej osi bez powodowania przesunięć. Cały mechanizm obrotu został umieszczony poza przestrzenią pomiarową tunelu.

Na podstawie zmierzonych wartości sił przeprowadzono analizę sił stycznych i normalnych działających na łopaty turbiny w zależności od strugi powietrza i kąta obrotu łopaty.

Zasada działania turbiny VAWT wymaga, aby wartości sił stycznych w zakresie kąta obrotu łopaty od 0 do 180 stopni, czyli tam, gdzie profil łopaty przyjmuje kształt wklęsły, były większe niż dla przekroju wypukłego, czyli w zakresie kąta obrotu łopaty od 180 do 360 stopni. Z punktu widzenia obciążeń przenoszonych przez łopatę na ramię turbiny, wyniki pomiarów i obliczeń wykazują, że występuje siła ściskająca wywołana siłą normalną oraz siła zginająca o zmiennym kierunku wywołana siłą styczną.

## 5 BADANIA SYMULACYJNE

W tym rozdziale podjęto się ustalenia wartości oraz rozkładu sił i naprężeń działających na konstrukcję turbiny podczas jej eksploatacji za pomocą modelowania aeroelastycznego oraz obliczeń analitycznych. Punktem odniesienia dla nich będą badania eksperymentalne opisane w rozdziale czwartym. W ramach pracy skupiono się na:

- doborze istotnych prędkości strugi powietrza,
- symulacji CFD jednej łopaty ,
- symulacji CFD turbiny SVAWT,
- wyznaczeniu siły odśrodkowej,
- symulacji MES turbiny SVAWT,
- wyznaczeniu naprężeń w elementach turbiny,

Po przeanalizowaniu tych wszystkich aspektów, podjęto się wyznaczenia trwałości wybranych elementów konstrukcji.

Badania symulacyjne wykonano dla trzech zalecanych wartości prędkości strugi powietrza, działających poziomo do osi turbiny, eksploatacyjnej 7,5 m/s maksymalnej 15 m/s oraz ekstremalnej 52,5 m/s. W przypadku turbin HAWT zalecane są również wyznaczenie sił i dla przypadku poziomej zmiany kierunku strugi powietrza. Ponieważ wszystkie turbiny VAWT są niewrażliwe na takie zmiany w obliczeniach pominięto te przypadki.

### 5.1 Symulacje aeroelastyczne CFD

Badania przeprowadzono na modelu łopaty w celu zweryfikowania poprawności wyników uzyskanych na podstawie badań w tunelu aerodynamicznym. W celu uproszczenia symulacji przeprowadzono je dla 8 różnych kątów obrotu, co 45 stopni.

Wyniki tych badań potwierdziły charakterystyczne cechy badanego profilu łopaty, który, w przeciwieństwie do łopat stosowanych w turbinach typu Savoniusa i Darrieusa, wykazuje znaczne różnice w generowanych siłach pomiędzy stroną wklęsłą a wypukłą. Zastosowanie ćwierćsferycznych zakończeń łopaty powoduje wzrost ciśnienia w tym miejscu oraz generowanie sił wzdłuż osi pionowej łopaty. Jak wspomniano w drugim rozdziale, turbiny VAWT są podatne na działanie wiatru w kierunku pionowym, a w przypadku badanych łopat takie zjawisko może prowadzić do podrywania konstrukcji.

W przypadku symulacji całej turbiny oraz samej łopaty badania przeprowadzono na przestrzennym modelu dyskretnym. W celu uproszczenia i obniżenia zapotrzebowania mocy obliczeniowej, przeprowadzono je tylko dla 6 różnych położeń w odstępach co 12 stopni. Pozwoliło to na odwzorowanie pełnego obrotu zarówno łopaty, jak i turbiny wokół ich osi. Dla każdej z łopat wyznaczono składowe siły w osi X, Y i Z, niezależnie od jej kąta obrotu wokół osi. W przeciwieństwie do przebiegu i wartości otrzymanych w przypadku symulacji samej łopaty, siły te mają inny rozkład punktów charakterystycznych. Nie obserwuje się tak wyraźnych skoków dla kątów  $45^\circ$  i  $135^\circ$ , ani łagodnego wzrostu i spadku sił pomiędzy tymi kątami, jak w przypadku pomiarów w tunelu aerodynamicznym. Jest to spowodowane wzajemnym zasłanianiem się łopat, co jest szczególnie widoczne w przypadku łopaty nr 2. Po osiągnięciu przez nią kąta  $90^\circ$ , znajduje się w coraz większym cieniu aerodynamicznym łopaty nr 1. Wpływ mają również powstające turbulencje, widoczne na rysunku łopat nr 3 i 4, do których na ogół nie dociera niezakłócony przepływ powietrza.

Badania te ujawniły trzeci charakterystyczny element dla turbin VAWT, zwłaszcza dla konstrukcji o takim rodzaju łopat. Turbina generuje siłę jedynie w wąskim zakresie kąta obrotu, tj. od 0 do 144 stopni, gdzie maksimum występuje przy kącie 90 stopni. Symulacje wykazały, że przy pięciu łopatach w konstrukcji nie pojawia się moment, w którym wartość siły na stronie napływającej byłaby mniejsza od siły na stronie wypływającej, co powinno zapewnić ciągłą pracę turbiny. Różnica ta powoduje jednak, że konstrukcja jest obciążona niesymetrycznie względem osi działania strugi powietrza, a maksimum tej różnicy występuje, gdy łopata znajduje się w kącie obrotu 90 stopni. Taka sytuacja będzie powodować wibracje analogiczne do niewyważonego koła, a zjawisko będzie się nasilać wraz ze wzrostem tej różnicy.

## 5.2 Symulacje wytrzymałościowe MES

Przeprowadzono symulacje wytrzymałościowe badanej turbiny wiatrowej, uwzględniając obciążenia wiatrem przy prędkości eksploatacyjnej, maksymalnej oraz ekstremalnej. Ponieważ podczas pracy na urządzenie oddziałują także siły związane z jej obrotem oraz grawitacją, dlatego dla każdego rodzaju obciążenia przeprowadzono osobne badania. Pozwoliły one ustalić, w jaki sposób i w jakim stopniu wpływają na ostateczny rozkład i wartość powstałych naprężeń w konstrukcji turbiny.

Z badań wynika, że obciążenia grawitacyjne, związane głównie z cię-

zarem łopat, mają znaczenie tylko przy niewielkich prędkościach strugi powietrza. Przy prędkości ekstremalnej można je całkowicie pomijać. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku obciążenia wyłącznie siłą odśrodkową. Przy prędkości strugi powietrza  $v = 7,5\text{m/s}$  wartość naprężeń wywołanych nią jest niewielka i w porównaniu z naprężeniami wywołanymi obciążeniem wiatrem, można ją zignorować. Jednakże warto pamiętać o niej podczas projektowania mocowania łopat z ramieniem turbiny, szczególnie przy obciążeniu wywołanym prędkością maksymalną, np.  $v = 15\text{m/s}$ . Naprężenia wywołane siłą odśrodkową i grawitacyjną skoncentrowane są głównie na ramionach turbiny oraz ich połączeniach z łopatami i osią turbiny.

Największe naprężenia w konstrukcji występują w przypadku obciążenia wiatrem przy prędkości  $v = 52,5\text{ m/s}$ . Ich wartość głównie zależy od sił wywołanych działaniem strugi powietrza, a maksymalne naprężenia występują w punkcie mocowania osi z silnikiem. Podobnie jest w przypadku złożonego stanu obciążenia, występującego przy prędkości eksploatacyjnej i maksymalnej, gdzie największe naprężenia koncentrują się na połączeniu osi turbiny z łożyskiem.

### 5.3 Obliczenia analityczne

Z punktu widzenia projektanta, w celu zweryfikowania poprawności symulacji MES lub dokonania wstępnych obliczeń, przydatna jest możliwość przeprowadzenia prostych obliczeń analitycznych. Dlatego w ramach pracy przeprowadzono obliczenia analityczne trzech kluczowych miejsc w konstrukcji turbiny wiatrowej, wybranych na podstawie wyników symulacji MES. Następnie porównano wartości naprężeń zredukowanych, obliczonych na podstawie hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego, z wynikami uzyskanymi z symulacji MES, a także z naprężeniami dopuszczalnymi i projektowymi określonymi dla danego materiału.

Stwierdzono, że w przypadku ramienia turbiny i jego połączeń z łopata oraz osią turbiny, obie metody pozwalają uzyskać porównywalne wyniki. Jednak w przypadku połączenia osi turbiny z łożyskiem, zauważono znaczną różnicę pomiędzy uzyskanymi wartościami naprężeń zredukowanych. Ta różnica może być wynikiem zastosowania w symulacji siatki elementów skończonych o niewystarczającej dokładności.

Z punktu widzenia projektanta w celu sprawdzenia poprawności symulacji MES lub do wykonania wstępnych obliczeń przydatna jest możliwość wykonania prostych obliczeń analitycznych. Wobec tego w ramach pracy

wykonano obliczenia analityczne trzech newralgicznych miejsc konstrukcji turbiny wiatrowej, wytypowanych na podstawie symulacji MES. Porównano wartości naprężeń zredukowanych na podstawie hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego wyznaczonych na podstawie obliczeń z wartościami otrzymanymi na podstawie symulacji MES oraz z naprężeniami dopuszczalnymi i projektowymi wyznaczonymi dla danego rodzaju materiału. Stwierdzono, że w przypadku ramienia i jego połączeń z łopata i osią turbiny obie metody pozwalają otrzymać porównywalne wyniki. W przypadku połączenia osi z łożyskiem pomiędzy otrzymanymi wartościami naprężeń zredukowanymi wystąpiła znaczna różnica która może być podyktowane zastosowaniem w symulacji nie dość dokładnej siatki elementów skończonych.

#### 5.4 Symulacje trwałości zmęczeniowej

Obliczenia trwałości elementów konstrukcji turbiny wiatrowej wykonano w dziedzinie czasu wykorzystując metodę zliczania cykli, wyznaczone na podstawie symulacji MES obciążenia złożone, zredukowano do serii prostych obciążeń cyklicznych. Następnie dla każdego poziomu naprężenia stopień skumulowany został obliczony z krzywej SN dla stopu aluminium. Następnie wyznaczono uszkodzenie zmęczeniowe przy zastosowaniu reguły Palmgrena-Minera.

W badaniach założono, że urządzenie przy stałej prędkości strugi powietrza 7,5 m/s wykona przynajmniej  $10^9$  cykli pracy. Nie stwierdzono aby naprężenia symulacyjne powodowały skrócenia żywotności turbiny w którymś z jej elementów konstrukcji. W żadnym z elementów turbiny nie stwierdzono aby wartość uszkodzenia osiągnęła wartość mniejszą od 1, co mogło by oznaczać przedwczesne jej zniszczenie. Ustrój nośny turbiny został zaprojektowany z bardzo dużym zapasem. W celu sprawdzenia poprawności przyjętych założeń, z jakimi rodzajami naprężeń i w jakim stopniu wpływającymi na dane punkty mamy do czynienia, wyznaczono wskaźnik Biaxiality. W miejscach połączenia ramienia z łopata i ramienia z osią mamy do czynienia ze stanami pomiędzy dwuosiowym a jednoosiowym. W przypadku połączenia osi z silnikiem występuje karb w postaci promienia, wokół jego górnej krawędzi stwierdzono czyste ścinanie od naprężeń skręcających.

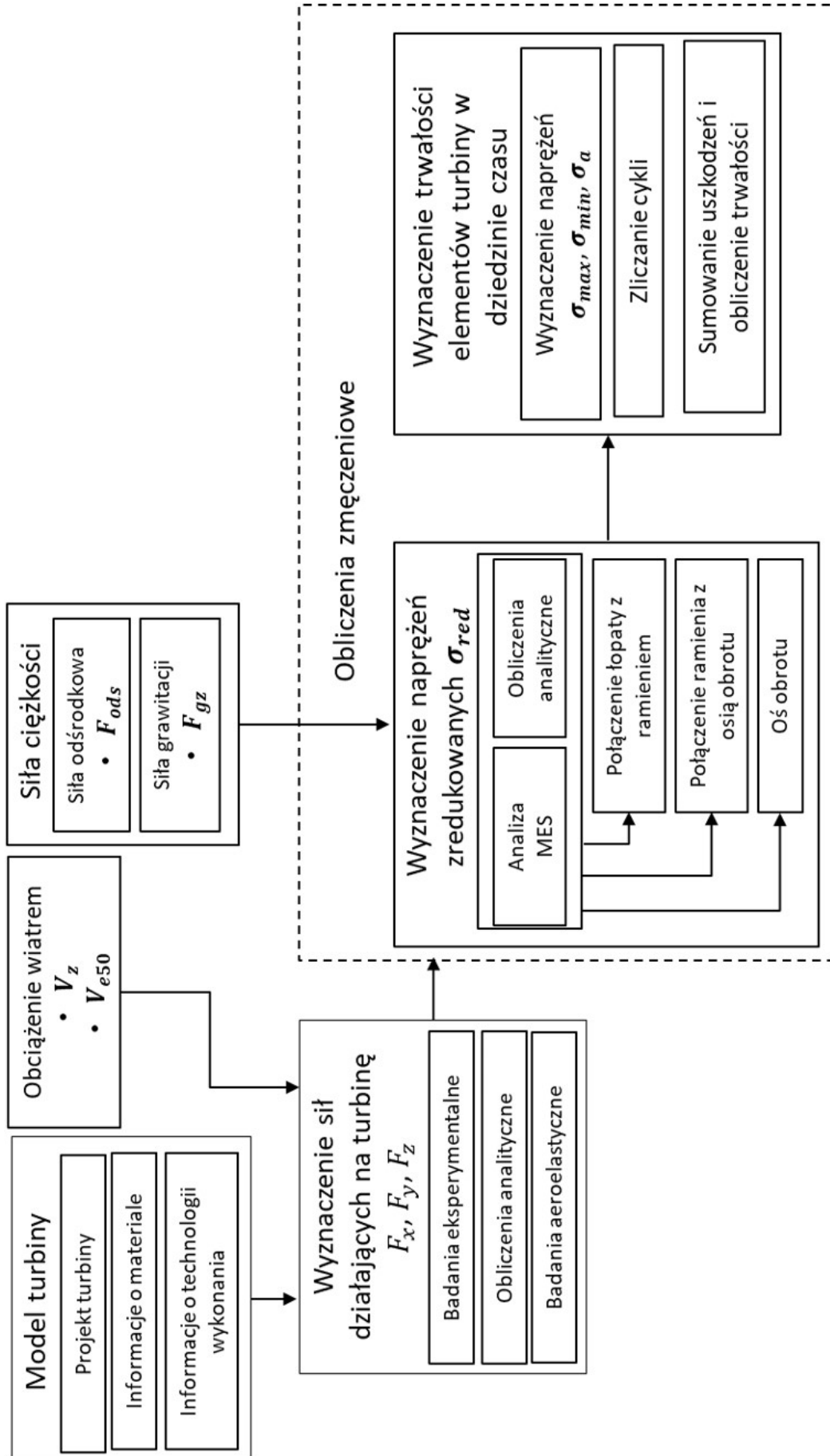


## 6 ALGORYTM

W tej części pracy przedstawiono schemat 6.1 algorytmu wyznaczania trwałości elementów turbiny wiatrowej typu VAWT o pionowej osi obrotu, ze szczególnym uwzględnieniem badanego kształtu łopat. Algorytm ten opiera się na aktualnie obowiązujących wytycznych zawartych w normie IEC 61400-2 i został dostosowany do specyficznej konstrukcji turbin VAWT. W ramach algorytmu, konieczne jest przeprowadzenie określonego ciągu działań, który został opisany poniżej:

- Przygotowanie modelu turbiny: Na tym etapie tworzy się model geometryczny turbiny, który jest niezbędny do przeprowadzenia analizy MES (Metoda Elementów Skończonych). Model może obejmować całą konstrukcję lub tylko łopaty, w zależności od celu analizy. Istotne jest, aby uwzględnić ewentualne uproszczenia w modelach CAD, które mogą wpłynąć na dokładność analizy MES. W badaniach CFD (Dynamiki Płynów) można usunąć niektóre elementy modelu, takie jak oś i ramiona turbiny, jeśli nie wpływają istotnie na wyniki analizy.
- Ustalenie warunków obciążenia: Warunki obciążenia konstrukcji turbiny wiatrowej zależą od wielu czynników, takich jak prędkość wiatru, działanie siły odśrodkowej i grawitacyjnej. Istotne jest ustalenie prędkości eksploatacyjnej i prędkości ekstremalnej wiatru, które stanowią główne źródło obciążeń. Siły odśrodkowe i grawitacyjne wpływają na mocowanie łopaty z ramieniem turbiny.
- Wyznaczenie wartości sił działających na elementy konstrukcji turbiny: W tym etapie określa się wartości sił działających na powierzchnie łopaty w zależności od jej kąta obrotu. Można to osiągnąć poprzez badania eksperymentalne, analizy MES lub obliczenia analityczne. Ważne jest uwzględnienie różnic wynikających z kształtu i budowy konkretnej konstrukcji turbiny.
- Obliczenia zmęczeniowe: Na podstawie uzyskanych wartości sił i naprężeń przeprowadza się analizy zmęczeniowe, które pozwalają na ocenę trwałości elementów konstrukcji. Wartości naprężeń są redukowane do postaci prostych cyklicznych, a następnie porównywane z krzywymi S-N materiału.

Ten algorytm stanowi kompleksowe narzędzie do analizy trwałości konstrukcji turbin wiatrowych VAWT, uwzględniając specyfikę ich działania i budowy.



Rysunek 6.1: Opracowany algorytm wyznaczania trwałości elementów turbiny wiatrowej VAWT.

## 7 WNIOSKI I SPOSTRZEŻENIA

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania mające na celu opracowanie algorytmu do określenia trwałości elementów turbiny wiatrowej VAWT, zwłaszcza w warunkach miejskich. Algorytm ten bazuje na znanych metodach analitycznych i aeroelastycznych, z wykorzystaniem obliczeń MES. W pracy przedstawiono przykład takiego algorytmu, który pozwala na określenie sił oddziałujących na całą turbinę lub na jedną z jej łopat, a także na wykonanie podstawowych obliczeń związanych z wytrzymałością i trwałością turbiny. Algorytm ten można dostosować do analizy różnych konstrukcji turbin wiatrowych VAWT, uwzględniając różną liczbę i kształt łopat.

Pierwszym etapem badania było zrozumienie obecnych norm, takich jak IEC 61400-1 i IEC 61400-2, które są głównie stosowane w odniesieniu do turbin HAWT. Normy te sugerują weryfikację integralności konstrukcji nowych turbin za pomocą badań eksperymentalnych, aeroelastycznych lub uproszczonych metod obciążeń. W ramach badań przeprowadzono badania eksperymentalne i symulacyjne na turbinie o pionowej osi obrotu, w celu dostosowania norm do specyfiki konstrukcji VAWT.

Na podstawie tych badań zidentyfikowano cechy charakterystyczne konstrukcji turbiny. Stwierdzono, że łopata generuje siłę napędzającą w wąskim zakresie kątów obrotu, głównie od 0 do 144 stopni, osiągając maksimum przy 90 stopniach. Zaobserwowano także niesymetryczne i cykliczne wartości sił w przypadku turbin o pięciu łopatach. Konstrukcja łopat wprowadza znaczące turbulencje i cień aerodynamiczny, szczególnie w zakresie kątów obrotu od 90 do 180 stopni.

Przeprowadzono również analizę wpływu prędkości strugi powietrza na obciążenie elementów konstrukcji turbiny. Okazało się, że obciążenia związane z grawitacją można pominąć, ale siła odśrodkowa ma wpływ na trwałość konstrukcji, zwłaszcza przy maksymalnej prędkości obrotowej urządzenia.

Na podstawie wyników badań zaproponowano modyfikacje konstrukcji turbiny w celu poprawy jej wydajności i trwałości. Zaproponowano usztywnienie konstrukcji łopat w osi pionowej, wzmocnienie połączenia łopaty z ramieniem oraz zmianę przekroju ramion na trójkątny, co może zwiększyć wytrzymałość i efektywność turbiny.

## Literatura

- [1] BERG, D. E. Structural design of the sandia 34-meter vertical-axis wind turbine. Tech. Rep. SAND84-1287, Sandia National Laboratories, United States, 1985.
- [2] DARRIEUS, G. Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current. Tech. Rep. No.1835081, US Patent, 1931.
- [3] FEDAK, W. *Stanowisko laboratoryjne do badania turbiny wiatrowej typu VAWT*. Opole, 2014.
- [4] GANCARSKI, W. *Symulacja pracy turbiny wiatrowej VAWT*. Opole, 2014.
- [5] IEC61400-1.2019. *Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements. Ed 4*. 2019.
- [6] IEC61400-2.2013. *Wind turbines - Part 2: Small wind turbines. Ed.3*. 2013.
- [7] LIN, J., XU, Y., AND XIA, Y. Structural analysis of large-scale vertical axis wind turbines part 2: Fatigue and ultimate strength analyses. *Energies 12* (2019).
- [8] LIN, J., XU, Y., XIA, Y., AND LI, C. Structural analysis of large-scale vertical-axis wind turbines, part 1: Wind load simulation. *Energies 12* (2019).
- [9] SAVONIUS, S. The s-rotor and its applications. *Mech Eng 53* (1931).
- [10] ULBRICH, R., ANWEILER, S., FEDAK, W., AND JAROSZ, B. Instalacje elektryczne z autonomicznym układem zasilania na bazie odnawialnych źródeł energii. *Instal 7(8)/ 2016, pp 26–30*. (2016).
- [11] VEERS, P. S. An approach to the fatigue analysis of vertical axis wind turbine blades. Tech. Rep. SAND81-2130, Sandia National Laboratories, United States, 1981.