

Kraków, 11 września 2023 r.

Prof. dr hab. inż. Marek S. Kozień  
Politechnika Krakowska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Mechaniki Stosowanej i Biomechaniki

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Wojciecha Gancarskiego**  
**pt. „Trwałość elementów turbiny wiatrowej VAWT”**

**1. Podstawa prawna**

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Wojciecha Gancarskiego pt. „Trwałość elementów turbiny wiatrowej VAWT” została wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria mechaniczna Politechniki Opolskiej, Pana dr hab. inż. Piotra Niesłonego, prof. PO (RNDIM/98/23), datowanego na dzień 06 lipca 2023 r. oraz właściwej przedmiotowej umowy. Komplet dokumentów dotyczących sporządzenia opinii został zarejestrowany przez Kancelarię Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej (data otrzymania) w dniu 12.07.2023.

**2. Charakterystyka pracy**

Recenzowana praca zawiera 115 stron. W zakresie merytorycznym obejmuje siedem rozdziałów i spis literatury. Praca uzupełniona jest spisem treści, spisem rysunków, spisem tabel, wykazem ważniejszych oznaczeń, streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz załącznikiem zawierającym wartości uzyskanych sił dla łopat turbiny uzyskanych w trakcie pomiarów i symulacji komputerowych.

W dwustronicowym **rozdziale pierwszym** zatytułowanym „Wstęp” omówione zostały założenia konstrukcyjne turbin wiatrowych o pionowej i poziomej osi obrotu oraz przedstawiona została konstrukcja turbiny karuzelowej, której analiza jest podstawą realizacji pracy doktorskiej. Ponadto pokrótce omówiono zawartość poszczególnych rozdziałów pracy.

W **rozdziale drugim** zatytułowanym „Przegląd literatury” przedstawiono kolejno wybrane zagadnienia, które są istotne dla realizacji pracy doktorskiej wraz z odniesieniem do literatury. Na początku przedstawiono rodzaje turbin o pionowej osi obrotu (VAWT). Następnie omówiono aspekty i metody analizy trwałości elementów turbin wiatrowych, rozumiejąc pod tym pojęciem zasadniczo metody analiz zmęczeniowych oraz sposobów opisu ilościowego obciążeń działających na turbinę. Kolejnym poruszonym zagadnieniem był opis przepływu wiatru w obszarach miejskiej zabudowy w aspekcie modelowania obciążeń turbiny wiatrowej. Następnie przedstawiono sposoby realizacji badań eksperymentalnych turbin oraz w dalszej kolejności możliwości wyznaczania obciążeń turbin metodami symulacji komputerowych zjawisk, w szczególności przy wykorzystaniu metody CFD. W kolejnym jednostronicowym **rozdziale trzecim** sformułowano cel pracy, przedstawiono (ramowo) zakres pracy oraz podano jej tezę. Kolejne trzy rozdziały zawierają przedstawienie istotnych z punktu widzenia realizacji pracy doktorskiej wyników badań i wynikających z nich wniosków. W **rozdziale czwartym** przedstawiono opis zaprojektowanego i wykonanego stanowiska badawczego w formie tunelu aerodynamicznego do doświadczalnego wyznaczenia sił działających na łopaty badanej turbiny w zależności od prędkości strugi przepływającego powietrza i kąta jej obrotu. Najobszerniejszy, liczący 54 strony **rozdział piąty** zawiera rezultaty analiz dotyczących wyznaczenia obciążeń, obszarów występowania maksymalnych naprężeń w konstrukcji oraz ich wartości zastępczych wykonanych metodą elementów skończonych oraz przy wykorzystaniu analitycznych formuł wytrzymałości materiałów. W **rozdziale szóstym** podano algorytm wyznaczania trwałości zmęczeniowej elementów turbiny wiatrowej. Ostatni **rozdział siódmy** zawiera wnioski i spostrzeżenia wynikające z realizacji pracy doktorskiej.

### **3. Ocena pracy**

#### **3.1 Ocena ogólna**

Praca doktorska dotyczy zagadnienia trwałości turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu analizowanej na przykładzie konstrukcji karuzelowej z łopatomy o kształcie podobnym do stosowanych w turbinach Savoniusa z wprowadzonym ich zakończeniami w postaci ćwierćsfery. Tego typu turbiny mogą być stosowane do generacji prądu do oświetlenia tablic informacyjnych bądź do zastosowań w terenie zabudowanym. Chociaż wytyczne do projektowania, badania i użytkowania turbin wiatrowych można znaleźć np. w normach IEC 61400-1:2019, IEC 61400-2:2013, IEC 61400-23:2014, to jednak mając na uwadze ich

ogólne sformułowanie oraz fakt że rozważane turbiny są małe, interesującym i istotnym zagadnieniem jest rozważenie sformułowania dedykowanego algorytmu wyznaczania ich trwałości. Autor podaje że „badana turbina przeznaczona jest do pracy w warunkach miejskich”. Może być „montowana na słupach, niskich domkach lub blokach”. Nie jest jednak jasne czy analizowana konstrukcja jest produkowana, czy nawiązuje się do produkowanych (np. różniąc się wprowadzonymi zakończeniami łopatek w postaci ćwierćkul), czy też jest autorską propozycją Doktoranta / Zespołu. Przedstawione analizy są rozwinięciem wcześniejszych prac Doktoranta („Symulacja pracy turbiny wiatrowej VAWT” [27]) i W. Fedaka („Stanowisko laboratoryjne do badania turbiny wiatrowej” [25]).

W celu analizy postawionego problemu zagadnienia określono siły działające na łopaty rozważanej turbiny karuzelowej w zależności od jej położenia w stosunku do kierunku i prędkości strugi powietrza (wiatru). Badania miały charakter doświadczalny i symulacyjny. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w zbudowanym tunelu aerodynamicznym. Natomiast badania o charakterze symulacyjnym wykonano przy wykorzystaniu metod obliczeniowej dynamiki płynów (CFD). Rezultaty badań umożliwiły w dalszej kolejności przeprowadzenie analiz wytrzymałościowych metodą elementów skończonych (MES) dla elementów turbiny. Określono tą metodą obszary koncentracji naprężeń, a następnie wykonano analizy o charakterze zmęczeniowym prowadzące do określenia trwałości konstrukcji. Dokonano również porównania rezultatów obliczeń wytrzymałościowych dla wybranych elementów turbiny przy wykorzystaniu symulacji MES oraz przy zastosowaniu standardowych formuł wytrzymałości materiałów dla zginania, skręcania i rozciągania/ściskania belek (prętów). Przeprowadzona i zweryfikowana ścieżka postępowania stała się finalnie podstawą do sformułowania algorytmu postępowania przy przeprowadzaniu analiz trwałościowych turbin VAWT.

W trakcie realizacji pracy doktorskiej istotnym jest sformułowanie jej tematu, celu i tezy. Należy podkreślić, że dla recenzowanej pracy są one określone spójnie i odnoszą się do trwałości elementów turbiny wiatrowej. Warto jednakże zastanowić się czy nie należałoby spojrzeć, na etapie pracy doktorskiej, na zagadnienie holistycznie i postawić jawnie problem trwałości turbiny jako konstrukcji (nie wnikając na tym etapie w szczegółową analizę trwałości np. przekładni). Wymagałoby to jawnego określenia obszarów niebezpiecznych spiętrzenia naprężeń w konstrukcji, a nie dla poszczególnych elementów, mając również na względzie własności wytrzymałościowe zastosowanych materiałów. Trudno mówić np. o wytrzymałości (trwałości) samej łopaty, elementów łączących czy też samego wału turbiny.

Jest to istotne mając na uwadze postawiony cel jakim jest budowa algorytmu wyznaczania trwałości.

Praca nie jest niestety napisana w wielu miejscach poprawnie pod względem językowym. Wiele zdań tekstu pracy zawiera błędy stylistyczne, co czyni te zdania często niezrozumiałymi bez znajomości szerszego kontekstu tematycznego. Często spotykane są też błędy gramatyczne i ortograficzne. Liczne występują też błędy typu „literówek”. Należy natomiast podkreślić dobrą czytelność wykresów oraz dobre wyważenie liczby wykresów w stosunku do tekstu.

### 3.2 Uwagi o charakterze merytorycznym

Do uwag o charakterze merytorycznym, które nie wpływają na poprawność dokonanych analiz zaliczyć należy:

#### 1) Strony 9-10.

Fragmety tekstu umieszczonego w rozdziale drugim „Przegląd literatury” są zbyt szczegółowe w sensie przedstawienia zastosowanych metod, ale równocześnie niekompletne (niezdefiniowane parametry). Przykładem jest opis uproszczonego modelu obciążenia (podpunkt 2.2.2) wraz ze wzorami (6)-(14), czy też zamieszczenie szczegółowych wzorów (16)-(18) (podpunkt 2.2.4). Wiele spośród zastosowanych we wzorach wielkości nie znajduje wytłumaczenia w tekście, a jedynie odniesienie do literatury ( $\Delta F_{zB}$ ,  $\Delta M_{sB}$ ,  $\Delta M_{yB}$ ,  $\Delta F_{x-shaft}$ ,  $m_B$ ,  $R_{cog}$ ,  $\omega_{n,design}$ ,  $g$ ,  $\Delta M_{x-shaft}$ ,  $\Delta M_{shaft}$ ,  $\lambda_{design}$ ,  $m_r$ ,  $e_r$ ,  $R$ ,  $L_{rb}$ ). W tekście pojawia się wyjaśnienie parametru  $\gamma_{design}$  (chyba powinno być  $\lambda_{design}$ ) jako „projektowy stosunek prędkości szczytowej”. Do czego odniesiona jest prędkość szczytowa? Przedstawienie metod powinno być zawarte w zasadniczej części pracy i być kompletne.

#### 2) Strona 11.

Przedstawiony opis jest zbyt szczegółowy (wzory) jak na „Przegląd literatury”, a zbyt pobieżny jak na pracę doktorską. Brak definicji funkcji  $PQ(S)$ ,  $P(s,v)(S,V)$ ,  $Pv(V)$ ,  $N(V)$  oraz zmiennych  $\sigma$ ,  $\bar{V}$ . W tekście pracy wprowadzenie tych funkcji nie powinno być zamknięte komentarzem „dokładny opis i wyprowadzenie wzorów do wspomnianych funkcji zawarto w załączniku A [65]”, szczególnie, że załącznik A dotyczy pracy, a publikacja [65] to Raport techniczny Sandia National Laboratory (USA). Ponadto brak jest skrótów PDF, DDF, EFR w wykazie „Indeksy i skróty”. Omawiany tekst powinien być umieszczony w zasadniczej części pracy z dokładniejszym komentarzem.

3) Strony 10 i 12.

Doktorant podaje, że „Badania [41] wskazują, że największy wpływ będą miały przypadki pracy turbiny dla normalnych prędkości wiatru oraz ekstremalnych podmuchów, kiedy urządzenie zostaje zatrzymane awaryjnie” (str. 10) oraz „Według autorów w procedurze nie uwzględnia się uszkodzeń turbiny powstałych podczas postoju i podczas cykli start-stop, ponieważ zdarzenia te mają niewielki wpływ na trwałość zmęczeniowa łopat” (str. 12). Czy jest możliwe aby w przypadku gwałtownego zatrzymania pracy urządzenia (jeśli tak to jest realizowane w praktyce) wskutek dodatkowych obciążeń siłami bezwładności lub samego uderzenia wiatru, wskutek dużych krótkotrwałych wartości obciążeń działających na łopaty, pojawiły się niebezpieczne z punktu widzenia wytrzymałościowego wartości naprężeń zastępczych bądź niebezpieczne z uwagi na wysokie wartości naprężeń oraz inne rejony ich koncentracji (niż w przypadku normalnej pracy urządzenia) wskutek drgań własnych konstrukcji? Czy były rozważane takie przypadki przy budowie algorytmu?

4) Wzór (15) i komentarz do wzoru (strony 10-11).

Sformułowanie będące komentarzem do równania (15): „gdzie  $M$ ,  $C$  i  $K$  to odpowiednio macierze masy, tłumienia Rayleigha i sztywności;  $u$  jest wektorem przemieszczenia złożonym ze wszystkich przemieszczeń i obrotów wszystkich węzłów... $FW$  to obciążenie wiatrem,  $FG$  to grawitacja; a  $FI$  to siła początkowa, obejmująca siły odśrodkowe i siły Coriolisa. Odkształcenie można wyodrębnić z obliczonego przemieszczenia”. Równanie wprowadzone zostało do tekstu niepotrzebnie, szczególnie mając na uwadze błędy w komentarzu. Należało podać na początku, że równanie (macierzowy zapis układu równań) zapisane jest dla węzłów siatki wynikającej z podziału struktury typu continuum materialnego. Nie ma pojęcia obrotu węzła. Wielkości występujące po prawej stronie to siły uogólnione w węzłach i nie można komentować tego dowolnie (obciążenie wiatrem, grawitacja, siła początkowa). Skąd nazwa siła początkowa, skoro dalej mówi się o sile odśrodkowej i Coriolisa. Jeśli występuje siła Coriolisa to o jakim układzie współrzędnych jest mowa („obracaającej się ramie XYZ”!)? Odkształcenie nie jest wyodrębniane na podstawie przemieszczenia, a wyliczane na podstawie przemieszczeń. Ponadto macierz  $M$  oznaczona czcionką bez pochylenia typu bold, a macierze  $C$  i  $K$  czcionka pochyłona bez pogrubienia oraz brak jest indeksowania w opisie sił  $FW$ ,  $FG$ ,  $FI$ .

5) Strona 48.

O jakim kształcie sześcianu jest mowa w zdaniu: „wprowadzając lokalne zagęszczenie siatki w postaci sześcianu o wymiarach 3,25 m długości, 1.5 m szerokości i 0,5 m wysokości”? W jaki pojęciu jest mowa o zagęszczeniu siatki? Nie jest to rozmiar pojedynczego elementu siatki.

6) Strona 61.

W opisie modelu stosownego dla analiz strukturalnych metodą elementów skończonych brak jest dokładniejszych danych o rodzaju zastosowanych elementów skończonych. W tekście jest mowa, że: „przyjęto siatkę zbudowaną z elementów trójkątnych 3D”. Jaki jest to typ elementu?

7) Rysunki 5.28-5.36.

Co oznacza „rozkład naprężeń”? Jakie są to naprężenia (zastępcze)? Ponadto w komentarzu na stronie 63 i dalej występują mało precyzyjne stwierdzenie „najwyższe naprężenia koncentrują się”.

8) Strona 92 – Wnioski i spostrzeżenia.

We wnioskach podane jest stwierdzenie: „przykład takiego algorytmu opisano w rozdziale 6”. Celem pracy było sformułowanie algorytmu. W jakim sensie jest mowa o jego „przykładzie”?

### 3.3 Uwagi redakcyjne

Do uwag o charakterze redakcyjnym zaliczyć należy:

1) Błędy dotyczące pisowni wyrazów razem bądź osobno:

„kilkunasto-metrowej” (str. 1), „dwu wymiarowej 2D” (str. 21), „trzy wymiarowej 3D” (str. 21; powinno być „trójwymiarowej”), „mikro kontrolera” (str. 25), „pół walca” (str. 27), „ćwierć sferą” (str. 27), „ćwierć kopułki” (str. 39), „pięcio-łopatowej” (str. 59), „tym czasem model konstrukcji” (str. 80), „jest to trzy krotnie większa” (str. 84).

2) Błędy ortograficzne:

„i od konta z jakim” (str. 44), „włukna szklanego” (str. 61).

3) Błędy gramatyczne w odmianie wyrazów i poważne błędy stylistyczne:

„wyznaczania trwałość zmęczeniowej” (str. 3), „modelowanie aeroelastyczne wykorzystywana jest” (str. 10), „oddziaływanie wiatru na konstrukcje turbiny symulowany jest” (str. 19), „pozwala on na rejestrowanie: siła naporu..., prędkość strugi...” (str. 27), „pół walca wysokość 400 mm” (str. 27), „badana turbina

przeznaczona jest do pracy w warunkach miejskich montowana na słupach, niskich domkach lub blokach” (str. 35), „prędkości wiatr” (str. 59), „pierwsza z nich waży  $m_{FCG}=0.1$  kg natomiast 2  $m_{AI}=0.5$  kg” (str. 59; „2” - druga powinna być wyrażona słownie).

4) Literówki:

„opisanych równanie (15)” (str. 10), „a  $u(t)$  losowymi fluktuacjami” (str. 15; w kontekście zdania powinno być „są losowymi”), „zagęszczenia sitki” (str. 21), „cała konstrukcję” (str. 24), „konstrukcję zaprojektowano i zbudowana pod założone” (str. 24), „do wyznaczenia prędkości eksploatacyj skorzystano” (str. 34), „ $\alpha$  0.2 stała z normy” (str. 35), „spiętrzenie powietrza w powstałych wklęsłościach 5.9 a co za tym idzie wzrost ciśnienie” (str. 39), „może być tutaj powstania sił” (str. 39), błąd ma spora zależność (str. 44), powodować recyrkulacje, która” (str. 45), „dokładnego obraz rozkładu ciśnienia” (str. 48), „pod innym kątem” (str. 55), „oznacza to będzie” (str. 56).

5) Strona 5.

W opisie na Rysunku 2.3 „ $\sigma_{max}$ ” bez indeksu.

6) Strona 10.

W użytym kontekście raczej „oddziaływanie gazu” niż „działanie płynu”.

7) Strona 13.

Nieczytelne sformułowanie: „można wyznaczyć ich poziomy podział na”.

8) Strona 14.

Niewyjaśnione i żargonowe sformułowanie: „w interesującym nas przedziale IBLs ulicy”. Co to jest IBLs i dlaczego jest o tym mowa? W pracy naukowej należy unikać formy osobowej „nas”.

9) Rysunek 2.6 (strona 14).

Czy jest to diagram jak jest napisane w opisie rysunku? W jakim sensie chropowatości? Wcześniej w tekście jest mowa o szorstkości (str. 13). Czy zamiast nazwy „podwarstwa inercyjna” nie powinno być „podwarstwa przepływu laminarnego”? Skąd określenie „inercyjna”? Czy zamiast nazwy „podwarstwa chropowatości” nie powinno być „podwarstwa przepływu turbulentnego”?

10) Strony 17 i 20.

Niezrozumiałe wprowadzenie w tekstach podpunktów 2.4 i 2.5 pojedynczych numerowanych podpunktów 2.4.1 i 2.5.1 umieszczonych w środku tekstów podpunktów.

11) Strona 19.

Zamiast „poruszający się płyn (powietrze lub wodę)” lepiej przepływający płyn (ciecz lub gaz)”.

12) Strona 20.

Autor zbyt swobodnie posługuje się skrótami charakterystycznymi dla wykorzystywanego oprogramowania bez dodatkowych wyjaśnień, np. „stosowany jest wówczas przepływ nieskompresowany LES lub RANS”. Cały fragment dotyczący specyfiki modelowania CFD nie powinien znajdować się w rozdziale „Przegląd literatury”, a w stosownym miejscu dotyczącym symulacji CFD.

13) Strona 21.

Użyto niejasne określenia charakteryzujące siatkę: „wielkość, rozdzielczość i struktura”. Powszechnie mówi się o gęstości siatki i kształcie elementów siatki.

14) Strona 24.

Zamiast „Zgodnie z tym podjęto się zaplanowania, budowy stanowiska i realizacji badań” lepiej „W tym celu zaprojektowano i wykonano stanowisko do badań, a następnie zrealizowano badania”.

15) Strona 24.

Autor podaje „Badania wykonano...w zakresie pacy najczęściej stosowanych silników”. „Silników” czy „generatorów”?

16) Strona 28.

Jeżeli wcześniej w tekście jest mowa, że „siły zmierzono w dwóch osiach, X dla kierunku zgodnego z przepływem powietrza...i dla kierunku prostopadłego Y” to we wzorze (21) nie mogą występować składowe sił  $F_x$  i  $F_y$ , jak we wzorze (20). Ponadto brak jest komentarza dotyczącego kąta  $\alpha$ . Gdzie był stosowany wzór (21)?

17) Strona 30.

Pomiar odbywał się w laboratorium, zatem zamiast „w zależności od prędkości wiatru” powinno być „w zależności od prędkości strugi powietrza”.

18) Strona 32.

Zamiast „moc  $P$  generowanej łopaty” powinno być „moc  $P$  generowana przez łopatę”.

19) Strona 34.

Sformułowania „Istotnym w takim przypadku jest punkt odniesienia” oraz „Punktem odniesienia dla nich będą” są publicystyczne. W tekście pracy powinno się odnieść do weryfikacji modelu poprzez porównanie z wartościami uzyskanymi w eksperymencie.



20) Opis rysunku 5.1 (str. 35).

Zamiast „prędkość wiatru względem wysokości” powinno być „prędkość wiatru w funkcji wysokości”.

21) Strona 36.

Sformułowania „pomimo wielu zalet symulacji 2D”, „wobec tego symulacje 3D pozwoli otrzymać pełniejszy obraz sił” są zbyt ogólnikowe w pracy doktorskiej.

22) Strona 36.

Zamiast „wobec tego zastosowany będzie przepływ nieściśliwy” powinno być „dlatego zastosowany będzie model płynu (przepływu) nieściśliwego”.

23) Strona 38.

Zbyt uproszczone sformułowania: „powoduje jego spiętrzenie, a co za tym idzie zwiększając wydajność łopaty”, „łopata stawia największy opór, powodując za sobą przy okazji największe turbulencje”.

24) Strona 38.

Zamiast „przedstawiono wyniki symulacji na płaszczyźnie poziomej” powinno być „w przekroju poziomym”,

25) Strona 39.

Zdanie niestylistycznie sformułowane: „Cechą charakterystyczną badanych łopat są ćwierć kopułki na obu jej końcach, jest to rozwiązanie nie stosowane w konstrukcjach Saveniusa czy Darrieusa, mająca na celu zapobieganie swobodnemu wypłynięciu strumienia powietrza końcami łopaty.”

26) Strony 39–40.

Niezręczne sformułowanie zdania: „Efektem negatywnym może być tutaj powstania sił na końcach powodujący rozciąganie w pionie profilu i w połączeniu z siłą pchającą jego wyginanie”. Określenia „siła pchająca” i „wyginanie” są kolokwialne.

27) Strona 41.

Niepotrzebne nacechowanie w zdaniu „Oczywiście mamy tu do czynienia”.

28) Strona 44.

Określenie błędne i nieprecyzyjne: „Skala przebiegów wykresów jest podobna”.

29) Strona 44.

Określenie nieprecyzyjne: „Jednak w zaprezentowanych przypadkach można zauważyć, że błąd ma spora zależność od prędkości wiatru i od konta z jakim łopata jest

symulowana”. Co oznacza spora zależność”? Łopata jest usytuowana/ustawiona pod kątem, a nie „symulowana” pod kątem.

30) Strona 44.

Nieprecyzyjne sformułowanie zdania: „Przepływ wiatru wzdłuż doskonale płaskiej powierzchni ma logarytmiczny profil powodowany przez szorstkość powierzchni”. Zamiast „przepływ wiatru” powinno być „rozkład prędkości powietrza/strugi”, zamiast „szorstkość powierzchni” powinno być „chropowatość powierzchni” lub „nieidealność powierzchni”.

31) Strona 45.

Zbyt kolokwialne sformułowanie: „co więcej zastosowane zawężenia na wejściu mogą powodować recyrkulacje, która drastycznie zmienia i komplikuje profil przepływu”.

32) Strona 54.

Zbyt kolokwialne sformułowanie: „to siły musiały się znieść”.

33) Strona 55.

Niepoprawne sformułowanie zdania: „W stosunku do przedstawionych wyżej sił wypadkowych mają one niewielkie wartości, lecz również burzliwy przebieg”. Co oznacza „burzliwy przebieg” sił?

34) Strona 59.

Sformułowanie pospolite: „Pierwsza z nich waży  $m_{FCG}=0.1$  kg natomiast 2  $m_{AI}=0.5$  kg”. Zamiast „waży” powinno być „masa wynosi”.

35) Analiza trwałości (podpunkt 5.7).

W analizach trwałości jako projektową żywotność przyjęto możliwość realizacji  $10^9$  cykli turbiny (20 lat pracy turbiny przy liczbie 87.5 obrotów na minutę odpowiadająca prędkości wiatru wynoszącej 7.5 m/s). Analizy dokonano przy wykorzystaniu pakietu do obliczeń zmęczeniowych *Fatigue* w programie metody elementów skończonych *Ansys*. Jak wygląda przyjęty wykres Wöhlera dla analizowanego materiału (aluminium 5754)? Czy cechuje go trwała (nieograniczona) wytrzymałość zmęczeniowa?

36) Strona 83.

Niefortunne sformułowanie „Algorytm można podzielić na kilka części” Algorytm to dokładnie określony ciąg działań prowadzących do określonego wyniku.

#### 4. Podsumowanie, wniosek końcowy

Recenzowana praca:

- Dotyczy oryginalnego problemu badawczego, mającym bezpośredni związek z konstrukcją turbiny VAWT, jakim jest opracowanie algorytmu do wyznaczania trwałości elementów turbiny wiatrowej VAWT.
- Wykorzystuje różnego typu modelowanie stosowane we współczesnej analizie wytrzymałości konstrukcji: symulacje komputerowe metodami obliczeniowej dynamiki płynów (CFD) przepływów powietrza, symulacje komputerowe metodą elementów skończonych (MES) prowadzące do wyznaczenia naprężeń w elementach turbiny, modelowanie wytrzymałościowe związanych ze zginaniem, rozciąganiem/ściskaniem i skręcaniem jednowymiarowych elementów konstrukcyjnych z uwzględnieniem w szczególności wpływu oddziaływania karbu.
- Zawiera analizy zmęczeniowe związane z modelowaniem wieloosiowego stanu naprężeń oraz zastosowaniem hipotezy kumulacji naprężeń przeprowadzone przy wykorzystaniu pakietu do obliczeń zmęczeniowych *Fatigue* w programie metody elementów skończonych *Ansys*.
- Zawiera porównania wyników analiz naprężeń uzyskanych przy zastosowaniu formuł analitycznych dla zginania, rozciągania i skręcania prętów/belek i przy wykorzystaniu modelowania metodą elementów skończonych.
- Obejmuje badania doświadczalne, które zostały przeprowadzone w zbudowanym w laboratorium tunelu aerodynamicznym do badań łopatek turbin, a w szczególności do wyznaczania obciążeń działających na te elementy wskutek przepływu powietrza o różnych prędkościach dla różnych położań łopatek.
- Zawiera w analizowanym przykładzie konstrukcyjnym przypadek łopat, których cechą charakterystyczną są ćwierćkopyłki umieszczone na obu jej końcach co jest rozwiązaniem nie stosowanym w konstrukcjach Savoniusa czy Darrieusa, a które ma na celu zapobieganie swobodnemu wypływowi strumienia powietrza końcami łopaty.
- Zawiera również ogólne i szczegółowe zalecenia konstrukcyjne dotyczące spotykanych rozwiązań turbin typu VAWT, jakie są wynikiem przeprowadzonych analiz.
- Zawiera w swoim tekście wiele potocznych sformułowań, przedstawionych w szczególności w punkcie 3.3, dotyczących również pojęć i zagadnień o charakterze

konstrukcyjnym i związanych z podstawami teoretycznymi stosowanych metod, które nie powinny wystąpić w takiej liczbie w tekście pracy doktorskiej.

- Zawiera uchybienia, omówione w szczególności w punkcie 3.2, które nie wpływają jednak na poprawność samej analizy oraz przedstawione wnioski.

Zdaniem recenzenta przedstawiona praca jest oryginalnym rozwiązaniem postawionego przez Autora problemu naukowego (celu pracy), jakim było opracowanie algorytmu do wyznaczania trwałości elementów turbiny wiatrowej VAWT pracującej w warunkach eksploatacji miejskiej. Realizacja tak postawionego celu wymagała wykazania się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie wytrzymałości materiałów i podstaw konstrukcji maszyn, w tym w obszarze analiz zmęczeniowych konstrukcji. Kluczowym było tutaj krytyczne i twórcze podejście zmierzające do określenia rzeczywistych obciążeń działających na konstrukcję (łopatki turbiny) wskutek opływu powietrza. W tym celu przeprowadzono szereg badań doświadczalnych przy wykorzystaniu zbudowanego tunelu aerodynamicznego, co pokazuje umiejętność projektowania i przeprowadzania badań doświadczalnych. Doktorant wykazał się również umiejętnością przeprowadzania analiz przepływów metodami obliczeniowej dynamiki płynów (CFD) oraz analiz wytrzymałościowych i zmęczeniowych metodą elementów skończonych (MES). Wszystkie te działania pokazują umiejętność prowadzenia przez Doktoranta samodzielnej pracy naukowej. Spełnione są zatem wymagania art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789) w związku z art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r., poz. 1669 ze zm.). Spełnione są również wymagania art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r., poz. 574 ze zm.). Dlatego też wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. inż. Wojciecha Gancarskiego do publicznej obrony.

