

**dr hab. inż. Tomasz Szolc,
profesor IPPT PAN**

Warszawa, dn. 22.10.2012

Zakład Technologii Inteligentnych
IPPT PAN, Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej
mgra inż. Arkadiusza Mroza
p.t.

„Adaptacyjna absorpcja obciążeń od ekstremalnych podmuchów wiatru w turbinach wiatrowych”

Wizerunek Doktoranta - Pana mgra inż. Arkadiusza Mroza

Mgr inż. Arkadiusz Mróz urodził się w 1978 r. Jest absolwentem Wydziału Inżynierii Łądowej Politechniki Krakowskiej. Dyplom Magistra Inżyniera z wynikiem bardzo dobrym uzyskał w roku 2003. Jak wynika z przedłożonych przez Doktoranta dokumentów, jeszcze przed zakończeniem studiów podjął pracę zawodową w zakładzie prefabrykacji konstrukcji stalowych firmy Mostostal-Kraków S.A. na stanowisku technologa. W 2004 roku rozpoczął działalność naukową w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Zakładzie Technologii Inteligentnych jako asystent. W międzyczasie odbył dwa zawodowe staże zagraniczne w Finlandii i w Danii. Pracując przez kilka lat z Doktorantem w tym samym zakładzie w IPPT PAN mogę stwierdzić, iż mgr inż. Arkadiusz Mróz jest mocno umotywowanym, ambitnym i rzetelnie pracującym młodym badaczem. Wymiernym wynikiem Jego dotychczasowej pracy w IPPT PAN jest współautorstwo w pięciu artykułach naukowych opublikowanych w recenzowanych czasopismach, w trzech zagranicznych publikacjach konferencyjnych oraz współautorstwo rozdziału w jednej monografii. Efektem finalnym działalności badawczej mgra inż. Arkadiusza Mroza do chwili obecnej jest napisanie rozprawy doktorskiej pt. *„Adaptacyjna absorpcja obciążeń od ekstremalnych podmuchów wiatru w turbinach wiatrowych”* złożonej do recenzji w 2012 roku.

Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgra inż. Arkadiusza Mroza jest napisana na 135 stronach maszynopisu w formie 7 rozdziałów, w tym jeden zawierający wstęp, tj. rozdział 1, oraz podsumowania i wniosków ujętych w rozdziale 7 zatytułowanym *„Zakończenie”*. Ponadto, manuskrypt zawiera trzy załączniki pod nazwą „Dodatków A, B i C”, dużą liczbę rysunków, wykresów, fotografii i tabel wraz z ich odpowiednimi spisami oraz spis cytowanej literatury obejmujący 71 pozycji.

W pracy została zaproponowana metoda łagodzenia przeciążeń dynamicznych łopat wirnika i masztu turbiny wiatrowej wywoływanych nagłymi podmuchami wiatru. W tym celu wykorzystano obrotowe aktulatory z cieczą magneto-reologiczną, nazywane przez Autora „sprzęgłami”, działające u nasady każdej z łopat wirnika. Aktulatory te pozwalają na swobodny obrót łopat wokół swoich osi podłużnych, tak by pod naporem wiatru łopaty zmniejszały opory czołowe przez samoczynne ustawianie swoich profili (wyznaczone tzw. kątem ustawienia łopaty) prostopadle do płaszczyzny wirnika, co z kolei Autor nazywa ustawieniem „w chorągiewkę”. Omawiane w pracy zagadnienie stanowi niezwykle istotny problem w eksploatacji turbin wiatrowych, średnice wirników których osiągają obecnie 250

m i więcej. Przy wynikającej z tego faktu długości łopatek wywoływane podmuchami wiatru nadwyżki momentów zginających i skręcających w sąsiedztwie ich nasad przyjmują niebezpieczne wartości. W obliczu takich sytuacji wprowadzenie dodatkowego systemu zabezpieczającego, działającego niezależnie od stosowanych powszechnie układów nastawiających kąty natarcia łopatek w zależności od siły i kierunku wiatru, jest pomysłem bardzo pożądanym i próbę jego urzeczywistnienia w ramach rozprawy doktorskiej można uznać za ambitną. Rozwiązanie tego problemu w przedłożonej pracy opisano w następujący sposób:

We Wstępie Autor sformułował cel pracy na tle obserwowanych obecnie tendencji rozwojowych energetyki wiatrowej i stosowanych technik sterowania pracą turbin. W rozdziale 2 Autor dokonuje przybliżonego opisu matematycznego nagłych wzrostów prędkości wiatru za pomocą formuł wyprowadzonych w oparciu o wyniki przeprowadzanych latami pomiarów prędkości wiatru w charakterystycznych miejscach na kuli ziemskiej, w tym w obszarach zainstalowania dużych farm elektrowni wiatrowych w Danii i USA. Rozdział 3 jest poświęcony opisowi obrotowego zamocowania łopatek wirnika w jego płaszczyźnie za pośrednictwem aktuatorów z cieczą magneto-reologiczną. Jak wspomniano powyżej, ów sposób zamocowania ma stanowić swojego rodzaju półaktywnie sterowaną nakładkę bezpieczeństwa przeciw gwałtownym podmuchom wiatru na powszechnie stosowane w turbinach wiatrowych mechanizmy nastawiania kąta natarcia łopaty w zależności od aktualnej średniej prędkości wiatru. W rozdziale 4 Autor opisuje przyjęty model fizyczny i matematyczny rozpatrywanych turbin wiatrowych. Przedmiotem rozważań w tym rozdziale jest wprowadzenie modelu dyskretnego o sztywnych łopatkach, natomiast w dalszej części pracy Autor posługuje się modelem dyskretnym o 903 stopniach swobody, w którym uwzględniona została podatność giętko-skrętna łopatek zgodnie z pewnym nie opisanym w rozprawie modelem łopaty opracowanym przez Promotora. Rozwiązania problemu we współrzędnych modalnych Autor poszukuje w ortogonalnej bazie wektorów własnych. W tym rozdziale zostały również opisane modele wymuszenia zewnętrznego wywołwanego wiatrem zgodnie z teorią pasową i teorią strumienia śmigłowego, które są szczegółowiej przedstawione w Dodatkach A, B i C na końcu manuskryptu. Ze względu na fakt wyrażania wymuszenia aerodynamicznego turbiny wiatrowej w postaci funkcji zależnej od odpowiedzi dynamicznej układu, modalne równania ruchu modelu mechanicznego zostały wzajemnie sprzężone i następnie przetransformowane do współrzędnych stanu, co miało ułatwić ich bezpośrednie całkowanie jako układu równań pierwszego rzędu. W rozdziale 5 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych uzyskane dla parametrów rzeczywistej turbiny wiatrowej o mocy znamionowej 5 MW i o średnicy wirnika 126 m, którą nazwano „turbina referencyjną”. Symulacje komputerowe działania półaktywnego systemu łagodzenia skutków gwałtownych podmuchów wiatru zostały poprzedzone analizą drgań własnych, co miało na celu subiektywny wybór tych postaci drgań w rozwiązaniu matematycznym problemu, które mogą mieć istotny wpływ na odpowiedź dynamiczną modelu badanego obiektu. Z kolei wyniki symulacji numerycznych przeprowadzonych dla różnych przypadków działania turbiny pod wpływem podmuchów normatywnych i ponadnormatywnych analizowano przede wszystkim z punktu widzenia procentowego zmniejszenia maksymalnych wartości przeciążeń dynamicznych łopatek wirnika w formie momentów gnących i skręcających w przekrojach ich zamocowania. W rozdziale 6 dokonano próby eksperymentalnej weryfikacji proponowanej adaptacyjnej absorpcji obciążeń od ekstremalnych podmuchów wiatru. Ten cel został zrealizowany przy wykorzystaniu stanowiska laboratoryjnego w postaci tunelu aerodynamicznego i „modelowej” turbiny wiatrowej o dwóch łopatkach wyposażonych w obrotowe aktulatory – sprzęgła z cieczą magneto-reologiczną. Owa weryfikacja polegała na zademonstrowaniu wpływu umożliwianego awaryjnego obracania profili łopatek w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wirnika na zmniejszenie wartości momentów gnących i

skręcających w nasadach tych łopát w warunkach założonej stałej prędkości nadmuchu powietrza realizowanego działaniem tunelu aerodynamicznego. Wyniki pomiarów porównano z odpowiadającymi im rezultatami obliczeń dokonanych za pomocą modelu dyskretnego o 43 stopniach swobody wspomnianej powyżej „modelowej” turbiny wiatrowej. Uzyskano dobrą zgodność wyników teoretycznych z doświadczalnymi.

Ocena wartości pracy

Oceniając wartość merytoryczną pracy należy podkreślić, iż Autor podjął się ambitnego i ważnego pod względem praktycznym zadania, szczególnie w obliczu wspomnianego powyżej dynamicznego rozwoju techniki wytwarzania energii elektrycznej za pomocą turbin wiatrowych. Godny uznania jest sam pomysł wykorzystania sprzęgieł z ciecżą magneto-reologiczną do awaryjnego obracania łopátami wirnika turbiny w celu podniesienia poziomu bezpieczeństwa pracy takiego urządzenia, jego trwałości i niezawodności, zwłaszcza w dobie obserwowanych ostatnio anomalii klimatycznych i związanych z nimi gwałtownymi zmianami pogody powodującymi silne, porywiste wiatry. Należy podkreślić fakt generalnie poprawnego zrealizowania tego pomysłu. Sposób modelowania badanego obiektu, przyjęte uproszczenia oraz metoda matematycznego rozwiązania są z zasady prawidłowe. Również weryfikacja doświadczalna wyników teoretycznych została przeprowadzona bardzo pomysłowo. Zastosowany w tym celu demonstrator – turbina wiatrowa w tzw. skali półtechnicznej obciążona wiatrem imitowanym działaniem tunelu aerodynamicznego pozwala na wiarygodną ocenę poprawności funkcjonowania proponowanej w pracy metody zabezpieczania rzeczywistej turbiny wiatrowej przed niebezpiecznymi przeciążeniami. W związku z powyższym, niewątpliwy aspekt aplikacyjny podjętego przedsięwzięcia urzeczywistniony nowoczesnym, mechatronicznym podejściem do układu mechanicznego podkreśla również jego naukowy wymiar, co z całą pewnością może stanowić przedmiot badań rozprawy doktorskiej.

Pomimo ww. zalet, pracę charakteryzują poważne mankamenty warte omówienia i przedyskutowania.

1. Istotne zastrzeżenia budzi opis matematyczny przyjętego w pracy modelu fizycznego badanego obiektu. Jest to typowy model dyskretny, którego równania ruchu wyprowadzono przy wykorzystaniu równań Lagrange’a II rodzaju. Zamieszczone w rozdziale 4 wyrażenia na energie i kolejne ich różniczkowania są w pracy doktorskiej zbędne, gdyż są to operacje dość oczywiste stanowiące zazwyczaj przedmiot ćwiczeń audytoryjnych dla studentów niższych lat uczelni technicznych. Również całe podrozdziały od 4.4.1 do 4.4.7 poświęcone analizie modalnej modelu matematycznego i transformacji modalnych równań ruchu do współrzędnych stanu można byłoby pominąć, ponieważ mają one charakter encyklopedyczny i czytelnik znajdzie je niemal w każdym podręczniku teorii drgań.
2. Całkowicie pominięto natomiast chyba najistotniejsze aspekty modelu fizycznego i matematycznego, a mianowicie charakter podatności łopát wirnika, masztu turbiny oraz układu napędowego generatora prądu. W przypadku łopát Autor zastosował działający na zasadzie „czarnej skrzynki” autorski program komputerowy Promotora, w którym każdą łopátę zastąpiono stu-masowym modelem dyskretnym o 300 stopniach swobody uwzględniającym jej podatność giętną najprawdopodobniej sprzężoną z podatnością skrętną. Wielka szkoda, że zabrakło w pracy informacji na temat przyjętego modelu fizycznego łopaty i sposobu jej dyskretyzacji. Zakłada się powszechnie, że łopátę wirnika turbiny lub helikoptera oraz płát śmigła lotniczego można traktować jako pręt zwinięty o zmiennym przekroju poprzecznym, którego deformacje giętne w formie zginania

ukośnego są zazwyczaj sprzężone z deformacjami skrętnymi. Jaki jest więc model mechanizmu tego sprzężenia: czy sprzężenie to jest powodowane założoną wstępną deplanacją przekrojów poprzecznych takiego pręta wywołaną stosunkowo dużym stopniem jego zwinięcia, czy też niepokrywaniem się środków zginania przekrojów poprzecznych pręta ze środkami ciężkości tych przekrojów? Te informacje wydają się być szczególnie interesujące z punktu widzenia nie tylko samego modelowania turbiny wiatrowej, lecz przede wszystkim dlatego, że właśnie te deformacje powodowane momentami gnącymi i skręcającymi są głównym obiektem badań w pracy. Ponadto, ruch masztu turbiny umożliwiany przez jego odkształcalność giętą opisano za pomocą jednego stopnia swobody. Podobnie, układ napędu generatora został zastąpiony modelem dyskretnym o dwóch stopniach swobody. W pracy brak jest informacji, w jaki sposób Autor wyznaczył zastępczą sztywność giętą masztu oraz sztywność skrętną elementu sprężysto-tłumiącego łączącego bryły sztywne reprezentujące bezwładności wirnika turbiny i generatora prądu. Należy podkreślić, że zarówno sam maszt oraz układ napędu generatora charakteryzują złożony kształt geometryczny i elementy dodatkowe, takie jak sprzęgła, czy przekładnia zębata.

3. W rozdziale 5 poświęconym obliczeniom numerycznym zamieszczone są przykłady przeprowadzanych symulacji półaktywnego sterowania obejmujące pełne cykle działania systemu, tj. wyłączenie sprzęgła magneto-reologicznego pod wpływem wirtualnego podmuchu wiatru i jego ponowne włączenie po ustaniu tego podmuchu i tym samym – powrót do stanu wyjściowego, czyli obciążenia turbiny wiatrem o założonej stałej prędkości początkowej. Szkoda, że w części doświadczalnej pracy demonstrowany jest jedynie spadek wartości momentów gnących i skręcających w przekrojach zamocowania łopat pod wpływem zmniejszenia ich obciążenia poprzez samo wyłączenie sprzęgieł magneto-reologicznych umożliwiające swobodny obrót łopat powodowany strumieniem powietrza o zadanej stałej prędkości wymuszonym działaniem tunelu aerodynamicznego. Takie podejście demonstruje wprawdzie sam efekt uzyskiwania możliwości nagłego zmniejszenia obciążenia łopat, lecz nie wykazuje prawidłowości funkcjonowania całokształtu proponowanej koncepcji półaktywnego sterowania w formie właściwego reagowania układu na nagle zwiększającą się prędkość wiatru oraz na powrót wartości tej prędkości do początkowej wartości średniej.
4. Awaryjny obrót łopat następuje na skutek wyłączania sprzęgieł umożliwianego zmniejszaniem lepkości cieczy magneto-reologicznej zależnej od przyłożonego napięcia sterującego wyznaczającego aktualną wartość natężenia pola magnetycznego, którego funkcją są własności tej cieczy. Jednak działające w ten sposób obrotowe aktulatory magneto-reologiczne, nazywane przez Autora sprzęgłami, są w istocie komercyjnymi hamulcami magneto-reologicznymi, do których napięcie sterujące jest przykładane tylko w przypadkach potrzeby wyhamowania ruchu obrotowego układu mechanicznego. Natomiast sprzęgło działa odwrotnie, co oznacza, że napięcie sterujące musi być przyłożone do niego na stałe przyjmując zapewne swoją maksymalną dopuszczalną wartość w celu utrzymywania stałego momentu blokującego możliwość obrotu łopaty i wyłączane jedynie incydentalnie w przypadkach nagłych, niebezpiecznych podmuchów wiatru. Taki tryb pracy pod permanentnym i raczej stosunkowo dużym napięciem sterującym może powodować przegrzewanie się cewek magnetyzujących cieczy magneto-reologiczną. Z jednej strony, przypuszczalnie ciepło to może być rozpraszane dzięki intensywnemu opływowi wiatru, ale niemniej jednak tak istotny prawdopodobny problem eksploatacyjny powinien zostać omówiony w pracy, zwłaszcza kiedy proponowana technika stała się przedmiotem zgłoszenia patentowego.

5. Pomimo niewątpliwej estetyki przedłożonego manuskryptu, redakcja pracy i przede wszystkim użyty język polski pozostawiają bardzo wiele do życzenia, przez co pracy nie czyta się łatwo. Podając kolejne fakty, Autor odsyła czytelnika do następnych rozdziałów rozprawy. Nie jest to właściwa praktyka redagowania publikacji naukowych. Na przykład, na stronie 49 w punkcie 4.4.8 Autor odsyła czytelnika do punktu 6.3.2 w dalszej jej części, we wzorach (4.1), (4.2), (5.2) brak jest objaśnień dotyczących wszystkich występujących w nich symboli. Trzeba doszukiwać się ich w kolejnych tabelach i rysunkach. Brak jest dostatecznie precyzyjnego opisu geometrii ruchu przyjętego modelu fizycznego turbiny wiatrowej. Autor wprowadził wprawdzie odpowiedni ruchomy i nieruchomy układ współrzędnych, ale powstały dzięki nim opis ruchu jest mało przejrzysty, co utrudnia zrozumienie tekstu. Przy wykorzystaniu tych układów nie dokonano jasnego zdefiniowania powtarzanego w całej pracy pojęcia „ujemnego” i „dodatniego” kąta obrotu łopaty. Mylącym jest stosowane określenie „moment skręcający” łopatę w kontekście sterowania jej położeniem kątowym jako ciała sztywnego. W celu ułatwienia zrozumienia tekstu, lepiej byłoby używać terminu „moment obrotowy” lub „moment obracający” łopatę. Autor wykazuje przy tym brak podstawowej wiedzy dotyczącej klasyfikacji modeli układów mechanicznych w celu przeprowadzania obliczeń. W całej pracy operuje pojęciem „modelu numerycznego”, nawet kiedy opisuje jego strukturę, omawia jego stopnie swobody, przedstawia go na przykład w punkcie 4.2, czy na stronie 29 „formuluje” go „we współrzędnych modalnych i uogólnionych” zapominając, że model numeryczny, nazywany również modelem komputerowym, jest jedynie programem napisanym w języku zrozumiałym dla komputera i odpowiednio przez ten komputer przetłumaczonym do postaci pliku wykonawczego. Natomiast funkcje opisujące współrzędne uogólnione lub modalne równaniach ruchu, równaniach więzów, warunków początkowych i brzegowych to przecież elementy modelu matematycznego stanowiącego opis ilościowy funkcjonowania modelu fizycznego badanego obiektu o określonej strukturze, liczbie stopni swobody itd.
6. Jednym z ważnych celów pisania dysertacji naukowych w języku ojczystym jest zachowanie prawidłowego rodzimego języka naukowego. Język polski użyty w omawianej pracy znacząco odbiega od języka naukowo-technicznego typowego w publikacjach naukowych. Jest to styl często spotykany w wewnętrznych raportach z wykonania inżynierskich prac zleconych. Przede wszystkim, charakteryzują go słownictwo pełne warsztatowego żargonu oraz niefrasobliwe tłumaczenia z języka angielskiego wielu pojęć i terminów specjalistycznych. Na przykład: zamiast wielokrotnie używanej „macierzy masowej” (ang. „mass-matrix”) powinno być „macierz bezwładności”, zamiast „model wielociałowy” (ang. „multi-body model”) w języku polskim funkcjonuje termin „model wieloczołowy”, modeli się nie formuluje, tylko przyjmuje (str. 29), nie formuluje się również równań, tylko je wyprowadza (tytuł punktu 4.2.2 na str. 31), turbiny się nie symuluje, tylko dokonuje symulacji ruchu jej modelu, zamiast wielokrotnie używanego „ruchu-” bądź „-wychylenia z płaszczyzny” należałoby używać raczej „w kierunku prostopadłym do płaszczyzny”, warsztatowe „zasprzęglenie” i „wysprzęglenie” ładniej byłoby zastąpić odpowiednio „włączeniem” i „wyłączeniem” sprzęgła, żargonowe „poprawne zamodelowanie odpowiedzi łopaty” na stronie 49 powinno być zastąpione „przyjęciem odpowiedniego modelu matematycznego uwzględniającego sterowanie ustawienia kąтового łopaty”, zamiast „odpuszczania łopaty” (str. 88) można by użyć wyrażenia „zmniejszenie momentu blokującego jej obrót”, obrazowe określenie „ustawienie w chorągiewkę” w rozprawie naukowej należałoby na jej początku odpowiednio zdefiniować geometrycznie, by następnie używać go jako umownej formy skrótowej, słowo „wiatrak” albo określenie „waga urządzenia” na

stronie 89 nie powinny być używane przez inżyniera itd. Tego typu przykłady można byłoby jeszcze długo wymieniać.

7. Usterki drobne rozprawy również świadczą o bardzo niestarannej jej redakcji. Tekst pracy charakteryzuje zła interpunkcja. Brak w nim przecinków tam, gdzie być powinny, natomiast często pojawiają się one w miejscach dla nich nieoczekiwanych. Tego typu błędy są tak częste, że trudno je cytować. Skoro rozprawę napisano w języku polskim, to dlaczego pozostawiono angielskie opisy rysunków 1.1 i 6.6, czy angielskie jednostki (rpm, deg) w tabelach 6.3, 6.4 i 6.5? Dlaczego cytowane w tekście rysunki i tabele pisano z dużej litery? Dlaczego jednostki wielkości fizycznych podawane w tekście pisano kursywą? Co oznaczają kropki, a co linie na rysunkach 6.20, 6.21, 6.22 i 6.23? Wiele tytułów podrozdziałów i rysunków jest sformułowanych w sposób niepełny i przez to nic nie mówiący. Na przykład: podrozdział 5.3 „Stan ustalony” – pytanie: czego? 5.4 „Odpowiedź na podmuch” – pytanie: czy mogłoby być „Odpowiedź układu wzbudzonego podmucha”? 6.2.2 „Dodatkowy mimośród” – pytanie: jaki? 6.3.3 „Łopaty” – pytanie: jakie? Rysunek 5.44 „Reakcja siły osiowej w szczycie wieży”: czy nie byłoby lepiej „Fluktuacja wartości siły reakcji w najwyższym położonym przekroju wieży”? Rysunek 5.48 „Prędkość obrotowa wirnika – podmuch normatywny”: czy nie byłoby ładniej „Zmiana prędkości obrotowej wirnika wywołana podmucha normatywnym”? Rysunek 6.16 „Współczynnik momentu” – pytanie: jakiego? Także jego podtytuły: „(a) pełny zakres”, „(b) fragment” – czego? Podobnie opisano rysunek 6.15 itd. Opisy (legandy) niektórych rysunków są niepełne. Na przykład na rys. 6.29, 6.30, 6.31 i 6.32 znaczenia symboli należy się samemu domyślać, szczególnie „tens-sym” i „tens-exp”. Nie wiadomo, co oznacza opis osi rzędnych wykresu pokazanego na rysunku 4.7.

Reasumując należy stwierdzić, iż umiejętność poprawnego napisania rozprawy naukowej nie przychodzi prędko i wymaga udzielenia rzetelnej pomocy młodemu naukowcowi przez doświadczonego zazwyczaj również i pod tym względem promotora. Niestety, jak widać, Autorowi tej pracy chyba nie było dane z takiej pomocy skorzystać, ponieważ studiując przedłożony manuskrypt odnosi się wrażenie, jakby Promotor tej pracy w ogóle nie czytał. Biorąc pod uwagę wymienione powyżej niewątpliwe walory merytoryczne rozprawy, tj. obrany ambitny cel i jego pomyślną realizację, praca mogłaby zrobić znacznie lepsze wrażenie, gdyby jeszcze raz można byłoby ją zredagować i staranniej napisać.

Stanowisko końcowe

Reasumując, należy stwierdzić, iż pomimo charakteryzujących pracę wspomnianych mankamentów merytorycznych oraz poważnych usterek redakcyjnych i językowych, oczywiste walory poznawcze i aplikacyjne omawianej rozprawy oraz zrealizowany w istocie cel, jak również ogólny wizerunek zawodowy Doktoranta – Pana mgr inż. Arkadiusza Mroza, pozwalają na nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm. Dz. U. z 2005 r., nr 164, poz. 1365) i na dopuszczenie dysertacji do publicznej obrony. Oczekuję przy tym pisemnej odpowiedzi Autora rozprawy na postawione w niniejszej recenzji główne uwagi krytyczne wymienione w punktach 1÷4. Ze względu na niedostateczny opis modelu matematycznego turbiny wiatrowej w rozdziale 4, satysfakcjonująca odpowiedź Doktoranta na uwagę wymienioną w punkcie 2 powinna stać się integralnym dodatkiem, na przykład „D”, do przedłożonej rozprawy.