

dr hab. inż. Damian Mazur, prof. PRz.  
Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Politechnika Rzeszowska  
tel. (017) 865 1296, mazur@prz.edu.pl

Rzeszów, 31.05.2015

Recenzja rozprawy doktorskiej  
**mgr Agnieszki Woźniak**

pt. „**PROCES KONWERSJI ENERGII KINETYCZNEJ WIATRU  
NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ  
W ZMIENNYCH WARUNKACH ATMOSFERYCZNYCH**”

dla Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej,  
napisana na zamówienie RM-530-12-03-2015 Dziekana, prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa, z dnia 13  
kwietnia 2015 roku.

### **1. Przedmiot rozprawy**

Wybór tematyki rozprawy należy uznać za zasadny oraz wymagający wiedzy z zakresu odnawialnych źródeł energii, a w szczególności elektrowni wiatrowych. Rozprawa stanowi wynik prowadzonych przez mgr Agnieszkę Woźniak badań dotyczących zagadnień z modelowania i analizy procesu konwersji energii elektrycznej wiatru na energię elektryczną w zmiennych warunkach atmosferycznych. Doktorantka przy projektowaniu wirnika przedstawiła wpływ zmienności prędkości wiatru w ciągu roku oraz obecności gondoli na pracę turbiny. Przykładowe obliczenia obrysu łopat i kątów skręcenia dla wirnika turbiny wiatrowej wykonane były dla dwóch lokalizacji oraz przy różnych współczynnikach potęgowych oraz różnych wartościach gęstości powietrza. Wykazała, że niejednorodność pola napływu, spowodowana pionowym profilem prędkości wiatru należy uwzględnić przy projektowaniu kształtu łopat. Zostały przeprowadzane również badania eksperymentalnego wyznaczenia profilu prędkości wiatru w tunelu aerodynamicznym.

Energetyka odnawialna z energii słonecznej czy wiatrowej odgrywa coraz ważniejszą rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego kraju przez dywersyfikację źródeł pozyskania energii, jak i uniezależnienie tej produkcji od paliw kopalnych. Ze względu na nieograniczone zasoby energii słonecznej i wiatrowej, konwersja ich w energię elektryczną jest wyzwaniem dla naukowców i przemysłu nie tylko związanego z szeroko pojętą elektrotechniką, energetyką i elektroniką. Wiąże się to jednak z koniecznością zapewnienia odpowiednich źródeł finansowania i to nie tylko samych

źródeł wytwarzania, ale również infrastruktury technicznej, umożliwiającej wyprowadzenie z nich mocy (linii przesyłowych i dystrybucyjnych), jak i rezerwowych źródeł wytwarzania (szczególnie przy energetyce wiatrowej). Zagadnieniem, które realizuje energetyka odnawialna, jest także ochrona środowiska. Należy także podkreślić, że energia pozyskiwana ze źródeł odnawialnych jest przy obecnym stanie techniki droższa od energii wytwarzanej w źródłach konwencjonalnych. Niezawodne dostarczanie energii elektrycznej o odpowiedniej jej jakości odbiorcom, należy uznać jako jedno z podstawowych zadań elektroenergetyki. Energia w obecnych czasach stała się strategicznym towarem. Warunkiem podstawowym niezawodnego przesyłania energii elektrycznej od wytwórcy do odbiorcy jest sprawne funkcjonowanie wszystkich elementów technicznych mających wpływ na jej przesył.

Główną przyczyną nieustającej potrzeby wzrostu wielkości turbin wiatrowych jest lepsze wykorzystanie większych prędkości wiatru na wyższych wysokościach, maksymalne wykorzystanie obszaru oraz minimalizacja kosztów na jednostkę.

## **2. Cel, zakres i układ pracy**

Rozprawa doktorska liczy 175 stron, łącznie ze spisem treści, spisem rysunków i tabel, wykazem oznaczeń, bibliografią oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. Praca składa się z 11 rozdziałów oraz wniosków i bibliografii, która zawiera 114 pozycji, w tym 9 prac autorskich bądź współautorskich.

Celem pracy była ocena czułości metody projektowej na odstępstwa w geometrii wirnika turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu, powstałe na skutek pionowego gradientu wiatru oraz obecności gondoli, na zmiany wyidealizowanych warunków napływu jednorodnego.

Rozdział pierwszy, zatytułowany „Wprowadzenie” zawiera cel i zakres pracy oraz przedstawia krótkie omówienie poszczególnych rozdziałów.

W drugim rozdziale zatytułowanym „Problemy surowcowe i ekologiczne energetyki opartej na spalaniu paliw kopalnianych” Autorka rozprawy zwróciła uwagę na konieczność ograniczenia emisji dwutlenku węgla. Przedstawiła w nim analizę obejmującą problemy energetyki w Polsce i na świecie na podstawie danych statystycznych sprzed kilku lat. Trzeci rozdział zawiera przegląd historyczny powstawania pierwszych elektrowni wiatrowych.

W czwartym rozdziale pt. „Energetyka wiatrowa, stan obecny i perspektywy rozwojowe” Doktorantka starała się wyjaśnić na podstawie opinii ekspertów ze Światowej Rady Energetyki, jaki wpływ ma kryzys gospodarczy na rozwój energetyki wiatrowej. Przedstawiła różne scenariusze rozwoju energetyki.

W piątym rozdziale pt. „Wiatr. Podstawowe charakterystyki wiatru” na podstawie dostępnych danych z pojedynczych lokalizacji zostały wyciągnięte wnioski co do zagadnień, które określa się przy ekspertyzach dotyczących przygotowania dokumentacji do wyznaczanie terenów pod farmy wiatrowe (wpływ szorstkości terenu, zmienności prędkości wiatru, w tym kierunku wiatru, na podstawie parametrów z anemometrów z istniejących stacji meteorologicznych, zainstalowanych na każdej turbinie wiatrowej itd.).

Szósty rozdział pt. „Wpływ parametrów konstrukcyjnych elektrowni wiatrowej na sprawność konwersji energii wiatru na energię elektryczną” zawiera podrozdziały dotyczące wpływu liczby łopat, określenia stopnia wykorzystania mocy, wpływ prędkości nominalnej, rozruchowej na uzyskaną moc.

W siódmym rozdziale pt. „Podstawy teoretyczne pracy elektrowni wiatrowej” omówiono teorię strumieniową, teorię elementu łopaty, uproszczone teorie wirowe, zmodyfikowaną metodę Witoszyńskiego, metodę linii nośnej.

Ósmy rozdział dotyczy projektowania wirnika pracującego w napływie osiowosymetrycznym z niejednorodnością wywołaną obecnością gondoli. Opracowała model matematyczny przepływu wokół gondoli turbiny wiatrowej. Do opracowania przyjęto pewne uproszczenia m.in. to, że gondolę modelowano jako elipsoidę obrotową. Udowodniono, że obecność gondoli ma znacznie mniejszy wpływ na parametry zaprojektowanego wirnika, niż pionowy profil prędkości wiatru. Przedstawiono przykłady obliczeń rozkładu kątów skręcenia oraz cięciw dla przepływu jednorodnego i niejednorodnego dla turbiny wiatrowej.

Rozdział 9 poświęcony jest zaburzeniom pochodzącym od pionowego profilu prędkości wiatru. Przedstawiono wyniki obliczeń składowej osiowej prędkości indukowanej z zastosowaniem metody numerycznej dla trzech przykładowych elektrowni oraz projektowanie aerodynamiczne wirnika turbiny wiatrowej z uwzględnieniem pionowego profilu prędkości wiatru.

Wychodząc z teorii strumieniowej opracowała matematyczny model przepływu niejednorodnego. Zajęła się problemem optymalnego rozkładu siły oporu wirnika pracującego w pionowym profilu prędkości. Wykorzystując równanie Eulera obliczyła składową osiową prędkości indukowanej na drodze numerycznej, a następnie wykorzystując znane zależności pomiędzy składowymi prędkości indukowanej, wyznaczyła jej składową obwodową. Korzystając ze zmodyfikowanej teorii Witoszyńskiego wyprowadziła równania rozkładu cięciw i kątów skręcenia wzdłuż łopaty. Należy uznać opracowany tak model jako osiągnięcie Doktorantki. Potwierdziła je przez weryfikację numeryczną dla różnych wartości wejściowych.

Porównanie modelu teoretycznego z danymi doświadczalnymi jest tematem 10 rozdziału. Przedstawiono zmierzone prędkości wiatru na różnych wysokościach w postaci histogramów oraz wyznaczono dla każdej wysokości funkcję gęstości prawdopodobieństwa według rozkładu Weibulla.

Doktorantka starała się udowodnić, iż wpływ gęstości powietrza jest mniejszy od wpływu profilu prędkości wiatru.

Eksperymentalne wyznaczenie profilu prędkości wiatru w tunelu aerodynamicznym jest tematem badań eksperymentalnych. Pionowy profil prędkości został uzyskany za pomocą siatek przysłaniających, nakładanych na przekrój wylotowy konfuzora.

Badania były przeprowadzone dla wszystkich możliwych ustawień siatek, tzn. z jedną, dwiema, trzema i czterema siatkami przysłaniającymi. Dla każdej kombinacji pomiary wykonane zostały dla ośmiu wartości prędkości przepływu tj.: 2,5 m/s, 5 m/s, 7,5 m/s, 10 m/s, 12,5 m/s, 15 m/s, 17 m/s oraz 20 m/s. Wartości prędkości odczytywane były dla osi pionowej sondy i mierzone z krokiem  $\Delta z = 20 \text{ mm}$ . Rozwiązanie to było dość innowacyjne, ale okazało się trafne, gdyż przy pomocy systemu pomiarowego skonfigurowanego do tego zadania badawczego udało się zasymulować profil prędkości wiatru, który następnie posłużył do zaprojektowania łopat wirnika. Korzystając z opracowanego we wcześniejszym rozdziale modelu matematycznego, przyjmując konkretne dane wejściowe, zaprojektowała wirnik dwułopatowy o średnicy 60 cm. Założona moc turbiny wynosiła 100 W, a prędkość obrotowa 1600 obr/min. Doktorantka do obliczeń wykorzystała charakterystyki profilowe wygenerowane w programie QBlade.

### **3. Merytoryczna ocena pracy**

Cel pracy zrealizowano poprzez:

- ♦ Opracowanie modelu matematycznego przepływu wokół gondoli turbiny wiatrowej
- ♦ Porównanie efektywności różnych metod nie stosowanych do tej pory w omawianym zagadnieniu – wychodząc z teorii strumieniowej opracowano matematyczny model przepływu niejednorodnego.

Poprzez zrealizowanie celu pracy, udowodniono tezę i potwierdzono hipotezę. Efektywność poszczególnych metod sprawdzono poprzez symulacje komputerowe. Wyniki zweryfikowano z rezultatami obliczeń analitycznych oraz z wynikami znanymi z literatury czy też uzyskanymi przy pomocy oprogramowania Qblade oraz badaniami w tunelu aerodynamicznym.

Wyniki badań, nawet przy poczynionych uproszczeniach, mają zastosowanie praktyczne. Przeprowadzone badania mogą zostać wykorzystane przez projektantów łopat oraz turbin wiatrowych.

### **4. Szczegółowe uwagi formalne i merytoryczne**

Układ redakcyjny pracy budzi wiele zastrzeżeń, można znaleźć sformułowania niepoprawne merytorycznie, błędy edytorskie i inne. Uwagi edytorskie przekazałem bezpośrednio Doktorantce i

tutaj ich nie przytaczam. W przyszłych opracowaniach naukowych proponuję Doktorantce aby zapoznała się z artykułem prof. Krystyna Pawluka pt. *"Jak poprawnie pisać tekst techniczny"*.

### **Uwagi krytyczne i pytania**

Wnikliwa analiza pracy nasuwa kilka krytycznych uwag i pytań. Uwagi te raczej wskazują kierunki dalszych badań, związanych bezpośrednio z tematyką poruszaną w pracy doktorskiej. Nie są argumentami dyskredytujących osiągnięcia Doktorantki.

- 1) Niejednoznaczne sformułowania są zawarte w rozprawie wskazujące na autora pracy: raz jest on określany w pierwszej osobie liczby pojedynczej, a raz w 3 osobie liczby mnogiej – „korzystaliśmy z uśrednienia danych 10-minutowych”. Określenia w 3 osobie liczby mnogiej przewijają się przez całą pracę najczęściej.
- 2) Nie mogę zgodzić się z tezą autorki "Z raportów dokonywanych przez Światową Radę Energetyczną wynika, że pomimo wzrostu tempa wydobycia, wielkość zasobów surowców kopalnych rośnie."
- 3) Mało precyzyjne tytuły rozdziałów i podrozdziałów i przykładowe błędy np.: „5. WIATR. PODSTAWOWE CHARAKTERYSTYKI WIATRU”, „ 8. PROJEKTOWANIE WIRNIKA W NAPŁYWIE NIEJEDNORODNYM OSIOWOSYMETRYCZNYM WYWOŁANYM OBECNOŚCIĄ GONDOLI”, „8.2. Wpływ gondoli”, „9.1. Wpływ profilu prędkości prędkość wiatru”, „10.5. Wpływ gęstości powietrza”, „10.7. Porównanie dwóch lokalizacji”.
- 4) Moje zastrzeżenia budzi brak wystarczającej i aktualnej analizy literatury krajowej jak i zagranicznej z zakresu przedmiotu badań w rozprawie. Doktorantka skupiła się na analizie ekonomicznej czy statystycznej danych dotyczących surowców i ich wpływu na życie ludzi. np. „Z kolei wartość średnia ilości energii elektrycznej wykorzystywanej przez jednego mieszkańca w danym kraju przekłada się na średni czas życia obywatela tego kraju.”
- 5) Doktorantka nie przedstawiła w drugim rozdziale bardzo ważnych analiz prawnych, ekonomicznych związanych z bezpieczeństwem energetycznym w Polsce (energia pierwotna a energia finalna, dekarbonizacja Polski) oraz dyrektywami UE (pakiet klimatyczno-energetyczny 3x20, Elementy poprawy efektywności systemów elektroenergetycznych, taryfy dynamiczne, elementy walki z deficytem mocy i stratami bilansowymi, zielone, białe certyfikaty).
- 6) Rozdział 3 pt. „RYS HISTORYCZNY WYKORZYSTANIA ENERGII WIATRU W TECHNICE” dotyczący przeglądu historii energetyki wiatrowej uważam za zbędny w rozprawie doktorskiej wraz z nadmierną ilością zdjęć, które nie wnoszą nic merytorycznego do pracy.
- 7) W rozdziale 4 „Energetyka wiatrowa, stan obecny i perspektywy rozwojowe” przeanalizowano perspektywę rozwoju z 2013 roku, natomiast nie ma mowy o różnych

scenariuszach rozwoju energetyki wiatrowej przygotowanych przez Ministerstwo Gospodarki, które przygotowało strategię pt. „Bezpieczeństwo Energetyczne i Środowisko – perspektywa do 2020 roku”. Wśród szczególnie ważnych wyzwań, wymienione zostały m.in. zmniejszenie energochłonności polskiej gospodarki poprzez modernizację energetyki i ciepłownictwa, dywersyfikację struktury wytwarzania energii poprzez wdrożenie i rozwijanie energetyki jądrowej oraz zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Strategia za kluczowe dla rozwoju polskiej gospodarki i sektora energetycznego uznaje stymulowanie „zielonego” wzrostu gospodarczego poprzez wyeliminowanie barier prawnych i administracyjnych, wykorzystanie innowacyjnych i przyjaznych środowisku technologii w rozwoju sektora energetycznego oraz konsekwentne i ustawiczne prowadzenie działań zwiększających konkurencję na rynku energetycznym. Właściciele farm wiatrowych oraz firmy, które pracują nad przygotowaniem ekspertyz wytyczania terenu pod farmy wiatrowe dokonują analiz minutowych, 10 lub 15 minutowych z własnych stacji meteorologicznych dla konkretnej turbiny w określonej lokalizacji, w dodatku z kilku anemometrów umieszczonych na różnych wysokościach. Po drugie korzystają z wyspecjalizowanego oprogramowania np. WindFarmer - Energy - DNV GL, Ewind. Na podstawie danych ze SCADY (zawierające zapis parametrów z opomiarowanych turbin) z poprzedniego dnia prognozuje się energię elektryczną, którą farma może wytworzyć od północy następnego dnia. Zmniejszenie strat z tytułu odchyień prognoz od produkcji energii ze źródeł odnawialnych następuje poprzez optymalizację kosztów funkcjonowania farmy wiatrowej. Uwzględniają przede wszystkim optymalizację planowanych serwisów turbin wiatrowych – w tym wyłączeń i remontów maszyn. GIS wykorzystany został, by wizualizacja mapy terenu była wysoce przejrzysta. Dzięki systemowi GIS, klient ma bogaty dostęp do określonych parametrów oraz części telemetrycznej monitoringu elektrowni wiatrowych.

- 8) Przedstawiona na Rys.5. 1. wieloletnia zmienność średniorocznych prędkości wiatru w latach od 1996 do 2007, opracowana wg danych IMGW Warszawa, nie jest adekwatna do rzeczywistości i obecnie nie stosuje się przy prognozach oraz wykonywaniu ekspertyz. Proszę powiedzieć jakie założenia i uproszczenia przyjęła Pani w rozdziale 5 ze względu na użyte sformułowanie „Zasoby teoretyczne wiatru mogą zmieniać się o kilkadziesiąt procent w porównaniu między kolejnymi latami. Dlatego analizowane wyniki powinny być poparte wieloletnimi obserwacjami.”
- 9) Na str. 52 autorka pisze: „Gdzie  $N(V)$  to wielomian opisujący zależność mocy generatora od prędkości, należy obliczyć współczynniki funkcji aproksymacyjnej np. metodą najmniejszych kwadratów. Chciałbym zapytać jaki może być wpływ użycia innej metody aproksymacyjnej na wyniki?”

- 10) Następnie nie ma tu informacji dotyczących zastosowanego generatora? Z tego co wiem to na farmach kupionych przez firmę IKEA zainstalowane są generatory DFIG 2MW. Jaki wpływ na produkcję może mieć zmiana generatora w turbinie wiatrowej? Jakby to wpłynęło na obliczenia? Jakie zna Pani metody sterowania turbinami wiatrowymi, typy pracy, rodzaje turbin i ich podział?
- 11) Co Pani rozumie przez roczną produkcję w zakresie „znamionowym” lub „podznamionowym”? W układzie sterowania przekształtnika maszynowego stosuje się metodę MPPT pozwalającą na wykorzystywanie maksymalnej mocy turbiny przy zmiennej prędkości wiatru.
- 12) Jaki wpływ na wyniki ma fakt nieuwzględnienia modelu matematycznego poszczególnych elementów systemu elektrowni wiatrowej: turbiny wiatrowej, generatora DFIG czy PMSG oraz przekształtników energoelektronicznych i układów sterowania. W algorytmach sterowania przekształtników energoelektronicznych stosuje się wektorowe metody sterowania. W układzie sterowania przekształtnika sieciowego stosowano metodę sterowania przepływem mocy czynnej bez poboru mocy biernej z sieci.
- 13) Krzywą mocy należy podzielić na 4 obszary – proszę podać ograniczenia, powyżej których może dojść do uszkodzenia wirnika?
- 14) Czy może Pani określić różnice pomiędzy pracą małych elektrowni wiatrowych a dużych? podać przykład pracy autonomicznej i sieciowej elektrowni małych oraz dużych? Potencjalny roczny uzysk energetyczny a rzeczywisty – jak duża różnica może wystąpić?
- 15) W rozdziale 5. 6. „Analiza efektywności produkcji energii elektrycznej i czasu pracy..” , chciałbym zapytać co Pani rozumie przez efektywność energetyczną, na czym polegała analiza?
- 16) Na Rys. 5.10 pokazano energię z zakresu podznamionowego, znamionowego i ich sumę – czy na pewno jest to dobrze uwzględnione z odpowiednich przedziałów prędkości?
- 17) Czy na pewno Rys.5.12 i Rys.5.13 przedstawiają procentowy udział produkowanej energii elektrycznej w poszczególnych zakresach pracy w zależności od prędkości średniorocznej oraz od szorstkości terenu? Nie widać tam ani procentowego udziału ani zależności od szorstkości?
- 18) Nie ma spójności w oznaczeniach oraz informacjach w tekście. Chciałbym zapytać co rozumie Pani przez moc nominalną, dla jakiej elektrowni o jakich parametrach został przedstawiony Rys.6. 3. Stopień wykorzystania mocy zainstalowanej (nominalnej) elektrowni w zależności od średniorocznej prędkości wiatru.? W jakiej lokalizacji?
- 19) Nie ma w pracy jasno przedstawionych założeń początkowych, co rozważamy, ile turbin, jaka jest ich lokalizacja i dlaczego taka a nie inna. Rozważa się dane archiwalne dla jednej

lokalizacji, przyjmuje się moce turbin oraz przyjmuje się stałą prędkość wiatru do rozważań, analizując dodatkowo szorstkość terenu. Na tej podstawie analizuje się sprawność i moc jaką może wyprodukować farma, bez uwzględnienia sezonowości, zmienności parametrów wietrznych oraz parametrów generatora turbiny oraz odniesienia tych wyników do modeli w komercyjnych aplikacjach.

20) W rozdziale 8.1 przyjęto założenia:

- przepływ powietrza wokół gondoli jest potencjalny, - co oznacza potencjalny?
- składowa osiowa napływu na tarczę wirnika jest superpozycją jednorodnego rozkładu prędkości wiatru i prędkości wywołanej wpływem gondoli – jak był uwzględniany wpływ gondoli? Czy nie warto było zrobić modelu numerycznego CFD? Co oznacza, że wirnik jest "umiarkowanie obciążony"?

21) Autorka nieprecyzyjnie definiuje wnioski – przykład:

„Podobne zależności wpływu szorstkości terenu zauważamy porównując ze sobą kąty skręcenia łopaty. Na rys.9.16 przedstawiono kąty skręcenia dla turbiny o mocy 300 kW, a na rys.9.17 dla turbiny o mocy 2,3 MW. Na uwagę zasługuje fakt małej różnicy pomiędzy kątem skręcenia obliczonego bez uwzględnienia pionowego profilu prędkości i z jego uwzględnieniem. Należy to porównać z dużą różnicą, jaka wystąpiła w obrysie łopat dla tej turbiny poprzez zestawienie podobnych zależności .”

22) Z czego wynika tak duża rozbieżność wzrostu współczynnika alfa z pomiarów rzeczywistych, który waha się pomiędzy 21% a 44% dla poszczególnych miesięcy? (Na rys.10.10, rys.10.11)

23) W rozdziale 10.3 używa Pani takiego sformułowania "Warto zwrócić uwagę, że przy zmianie wysokości pomiaru z 15 metrów na 40 moc wiatru wzrosła o blisko 50%". – na podstawie jakich pomiarów, czym mierzono, w jakim okresie, w jakiej lokalizacji, dla jakiej farmy, wg jakiego modelu wysnuwa Pani taki wniosek?

24) Na str. 109 „Na podstawie tych informacji wyznaczono średnie prędkości wiatru na wyższych wysokościach korzystając z danych z wysokości niższych i porównano je z rzeczywistymi średnimi prędkościami, obliczonymi z danych pomiarowych.” - jaki jest błąd oszacowania na wyższe wysokości np. na wysokość 100m? dlaczego odnoszono do wysokości 30 czy 40m, skoro wysokość wieży turbiny MM92 ma 90m?

25) Z jaką dokładnością przeprowadzała Pani analizę? Jakie były błędy pomiarowe ? czy udokładniała Pani model obliczeniowy, jaki wpływ miały uproszczenia na takie duże rozbieżności i błędy oszacowania? różnice na rozkładach cięciw i kątów skręcenia dla konkretnej turbiny? Z czego one wynikały? Czy przyjmując 2 łopaty w badaniach eksperymentalnych była Pani w stanie dokładnie ocenić wpływ i różnicę w stosunku do dużej



elektrowni wiatrowej? Jakie parametry wcześniej analizowane udało się Pani porównać poprzez wykonanie pomiarów?

### **Tematy do rozważenia**

1. Na podstawie śledzenia literatury tematu, wynika, że istnieją koncepcje zbudowania turbin wiatrowych o mocy 13 MW o 100 metrowych skrzydłach. W obiegowych informacjach istnieje negatywny odbiór środowiskowy istniejących instalacji (2-3 MW), nie tylko ze względu na hałas wytwarzany przez skrzydła (aerodynamiczny) oraz mechaniczny związany z przekładniami. Jakie są zatem koncepcje mające na celu zmniejszenie hałasu oraz innych niekorzystnych czynników dla środowiska.
2. Jakie zna Pani generatory i metody sterowania stosowane w elektrowniach wiatrowych, szczególnie do pracy w opisanych przez Panią zmiennych warunkach wiatrowych. Jakie dodatkowe aspekty trzeba uwzględnić, jeżeli dana instalacja działać ma w ramach farmy wiatrowej, w grupie od 10 do 100 turbin?
3. Proszę wymienić najpopularniejsze metody badań nieniszczących nad wykrywaniem uszkodzeń łopat turbin wiatrowych.
4. Częstotliwości drgań własnych są wskaźnikiem prawdopodobieństwa wystąpienia zwiększonych wibracji jedynie wówczas, gdy wibracje te bliskie są częstotliwości wzbudzającej. Jakich amplitud należy, Pani zdaniem, oczekiwać dla tych wibracji w trybie pracy przy opisanych zmiennych warunkach atmosferycznych ?
5. Proszę przedstawić główne założenie Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady UE w sprawie efektywności energetycznej? Jakie są scenariusze dla Polski na lata 2020, 2030, 2050? Co zmienia projekt: Prosument oraz OZE? Jakie są podpisane zmiany dotyczące polityki energetycznej z UE? Na czym ma polegać proces decarbonizacji Polski?
6. Proszę wymienić sposoby magazynowania energii? - Ich efektywność, sprawność oraz opłacalność.
7. Proszę przedstawić metody prognozowania energii elektrycznej stosowane w komercyjnych aplikacjach?
8. Jak się zmieni moc turbiny wiatrowej uwzględniając metody CFD z różnymi modelami turbulencji. Ponieważ do dyspozycji mamy dużą liczbę modeli turbulencji, ich wybór decyduje o dokładności obliczeń.

## 5. Ogólna ocena rozprawy i wniosek końcowy

Za główne osiągnięcia pracy uważam:

- Doktorantka uzasadniła konieczność rozwijania metod czerpania energii ze źródeł odnawialnych, w tym szczególnie z energii wiatru na lądzie oraz na morzu,
- zwróciła uwagę na wpływ na pracę elektrowni zmienności prędkości wiatru oraz szorstkości gruntu,
- określiła stopień wykorzystania elektrowni wiatrowej,
- opracowała, na podstawie teorii pracy turbiny wiatrowej, w szczególności zmodyfikowanej teorii Witoszyńskiego, metody projektowania turbiny wiatrowej pracującej w niejednorodnym strumieniu wiatru. Określiła wrażliwość metody na zmienne parametry napływu powietrza,
- opracowała metodę projektowania turbiny wiatrowej dla pracy przy częściowo pionowym przepływie wiatru,
- przeprowadziła porównanie wyników modelu matematycznego z pomiarami doświadczalnymi.

Cel pracy został zrealizowany poprzez:

- opracowanie odpowiedniej metody projektowania łopatek,
- uwzględnianie niejednorodności pola napływu, spowodowana pionowym profilem prędkości wiatru, przy projektowaniu kształtu łopatek wirnika i kątów ich ustawienia
- przeprowadzenie obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych w tunelu aerodynamicznym, porównanie i wyciągnięcie wniosków

Doktorantka wykazała się umiejętnością poprawnego wyboru i sformułowania naukowego celu pracy. Następnie logicznie i konsekwentnie, z dobrą znajomością zagadnienia, cel ten zrealizowała.

**Stwierdzam, że praca mgr inż. Agnieszki Woźniak spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zawarte w Ustawie o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. oraz Rozporządzeniu Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 i Rozporządzeniu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 15 grudnia 2005 r. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

