

**prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda**  
**Instytut Techniki Ciepłej**  
**Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa**  
**Politechnika Warszawska**

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Martyny Tomali,  
zatułowanej „*Dobór sposobów eksploatacji oraz planowanie badań  
diagnostycznych elementów turbin pracujących w elastycznych warunkach  
pracy w oparciu o analizę ryzyka*”

### **1. Podstawa formalna. Sylwetka Doktorantki**

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 11.10.2022 r. w wyniku uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka tej Uczelni z dnia 22.09.2022 r.

Dane dotyczące sylwetki Doktorantki, mgr inż. Martyny Tomali wymagane w treści niniejszej recenzji zgodnie z zapisami podanymi w zleceniu Przewodniczącego Rady przedstawione zostały w dokumencie stanowiącym załącznik do niniejszej recenzji.

Według mojej wiedzy Doktorantka nie ubiegała się uprzednio o nadanie stopnia doktora.

### **2. Zasadność podjęcia tematu**

W ostatnich latach, w wyniku obserwowanych zmian klimatycznych mamy do czynienia z próbą transformacji gospodarki, a w szczególności energetyki w kierunku ograniczenia, następnie rezygnacji z wykorzystania paliw kopalnych. Jednym z istotnych nurtów jest intensywny rozwój odnawialnych źródeł energii, w najszerszym zakresie tych korzystających z energii słonecznej i wiatrowej, a więc niegwarantujących stabilnej podaży energii. W Unii Europejskiej nurt ten znajduje silne wsparcie struktur administracyjnych, którego skutkiem jest tworzenie ram do przejścia na gospodarkę neutralną klimatycznie w horyzoncie roku 2050. Silnym akcentem jest nacisk na możliwie szybką rezygnację z wykorzystania węgla do wytwarzania energii elektrycznej.

W Polsce mamy do czynienia ze szczególnie wysokim, skrajnym na tle pozostałych krajów unijnych, uzależnieniem od wykorzystania paliw węglowych w elektroenergetyce (monokulturą węglową). Podstawową bazę wytwórczą KSE stanowią elektrownie systemowe wyposażone w bloki węglowe. Istotną część tego majątku stanowią wciąż bloki klasy 200 MW, których w naszym kraju zainstalowano łącznie 63, zaś do chwili obecnej pozostaje w eksploatacji 47. Jednostki te powstały w okresie dwudziestolecia 1963-1983, wszystkie są po modernizacjach, część po modernizacjach gruntownych. Niemniej liczba przepracowanych godzin przekroczyła we wszystkich przypadkach znacząco granicę 200 tys. będącą prognozowanym horyzontem eksploatacji na etapie projektowania. Z uwagi na pojawienie się w polskim KSE w ostatnich latach nowych bloków węglowych wielkiej mocy przy

równoczesnym intensywnym rozwoju energetyki wiatrowej oraz słonecznej charakter eksploatacji bloków klasy 200 MW ulega zmianie. Z pracy podstawowej jednostki te podlegają przesunięciu do roli źródeł podszczytowych i szczytowych. Oznacza to wzrost liczby odstawień i rozruchów oraz wzrost dynamiki zmian obciążenia przy równoczesnym skróceniu rocznego czasu pracy. Koniecznością staje się zweryfikowanie możliwości oraz skutków takiej zmiany, ewentualnie również dostosowanie kotłów oraz turbin do nowych warunków eksploatacyjnych.

Politechnika Śląska, a w szczególności Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki tej Uczelni to czołowy w naszym kraju ośrodek akademicki, w którym rozwijane są od dawna szerokie kompetencje w zakresie analizy procesów rozruchu turbin parowych z uwzględnieniem ograniczeń rzutujących na trwałość. Autorka ocenianej rozprawy, mgr inż. Martyna Tomala wykorzystała możliwość skorzystania z kompetencji macierzystego ośrodka ulokowanych w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych (do niedawna Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych) do podjęcia prac nad zadaniem polegającym na doborze (optymalizacji) sposobu eksploatacji turbin parowych przesuwanych do pracy podszczytowej i szczytowej. Jako szczegółowy obiekt istotnej części rozważań posłużyły turbiny klasy 200 MW. Zarówno zidentyfikowany problem jak i dobór obiektu rozważań uważam za trafny, odpowiadający aktualnym potrzebom. Podjęte zadanie uważam za bardzo ważne oraz interesujące, atrakcyjne z punktu widzenia prac o charakterze badawczym. W dodatku ma ono wyraźny aspekt aplikacyjny.

### **3. Charakterystyka i ocena rozprawy**

Podjęte w trakcie prac nad rozprawą zadanie dotyczyło doboru warunków eksploatacji i planowania badań diagnostycznych krytycznych elementów turbin celem zapewnienia bezpieczeństwa dalszego ich funkcjonowania oraz utrzymania produkcji energii do czasu powstania nowych źródeł. Przejście konstruowanych jako maszyny podstawowe turbin do obszaru pracy regulacyjnej skutkuje, między innymi, ryzykiem wzrostu propagacji pęknięć w strefach wysokiej temperatury w otworze centralnym wirnika oraz utraty trwałości wynikającym ze zużycia zmęczeniowo-pełzaniowego w rowkach cieplnych. W oparciu o przeprowadzoną identyfikację warunków eksploatacji w ocenianej pracy przeprowadzony został kompleks działań prowadzących do opracowania strategii eksploatacji i obsługi dla wytypowanych elementów krytycznych w horyzoncie czasowym ocenionym na 13 lat, z możliwością rozszerzenia do 20 lat.

Oceniana rozprawa podzielona została na 8 ponumerowanych rozdziałów, w tym trzy o charakterze ogólniejszym stanowią „Wstęp”, „Charakterystyka pracy bloków energetycznych” oraz „Podsumowanie i wnioski”. Pozostałe dotyczą bardziej szczegółowych rozważań nad kolejnymi podejmowanymi aspektami podjętego zadania badawczego. Tekst jest dość obszerny, liczy 192 strony. Pomimo to jego lektura nie jest nużąca. Autorka potrafiła spisać rozprawę w sposób bardzo interesujący, ze znaczącą pulą informacji dobrze naświetlających tło kolejnych rozważanych zagadnień.

Bibliografia cytowana w rozprawie zawiera znaczącą liczbę 134 pozycji: w postaci monografii, związanych tematycznie artykułów w czasopismach oraz (w liczbie 28) odwołań do stron internetowych. Doktorantka jest współautorką ośmiu spośród cytowanych w rozprawie pozycji. Są to w większości artykuły naukowe opublikowane w wysoko notowanych czasopismach, w tym artykuł w Energy oraz trzy w Energies. Należy więc zauważyć, **mgr inż. Martyna Tomala dysponuje znaczącym, przekraczającym typowy**

**dla kandydatki do stopnia naukowego doktora, dorobkiem publikacyjnym.** Jako zauważalny, moim zdaniem, brak na liście cytowanych prac należałoby wskazać silnie związaną tematycznie monografię prof. Zenona Orłowskiego „*Diagnostyka w życiu turbin parowych*” wydaną przez WNT w roku 2001, niestety nie wznawianą później.

Przedmiotem rozważań jest w ocenianej pracy w głównej mierze majątek wytwórczy energetyki krajowej, ze szczególnym odniesieniem do turbozespołów parowych klasy 200 MW. Na początku przedstawiona została analiza aktualnego stanu majątku wytwórczego i kierunków jego rozwoju, z uwzględnieniem prognoz zapotrzebowania na energię oraz przewidywanych na przyszłość uwarunkowań eksploatacyjnych, a w dalszej kolejności skutków zwiększonej elastyczności pracy bloków węglowych. W odniesieniu do turbin wskazane zostały obszary najczęstszych awarii z uwzględnieniem ich przyczyn związanych z długotrwałą eksploatacją w takich warunkach.

Doktorantka opracowała przedstawioną w rozdziale czwartym metodologię prognozowania stanu krytycznych elementów turbiny pod kątem występowania propagacji pęknięcia w otworze centralnym wirnika oraz zużycia materiału w rowkach cieplnych jako skutków zwiększonej elastyczności pracy. Rozważania oparto na modelu probabilistycznym wykorzystanym w trzech przyjętych scenariuszach dalszej eksploatacji. Przedmiotem analiz były: przekroczenie wymiaru krytycznego pęknięcia oraz zużycie zmęczeniowo-pełzaniowe w rowkach cieplnych wirników.

Przedmiotem rozważań w rozdziale piątym rozprawy była optymalizacja rozruchu turbin przekładającego się na proces nagrzewania elementów. W tym celu Doktorantka wykorzystwała dwa różne podejścia: optymalizację statyczną oraz dynamiczną. Optymalizacja statyczna polegała na modyfikacji dotychczasowych charakterystyk rozruchowych, z wyznaczeniem zachowanej następnie szybkości nagrzewania. Optymalizacja dynamiczna polegała na dobieraniu tempa nagrzewania w czasie rzeczywistym. Do tego celu stworzony został algorytm bieżącej kontroli naprężeń dla wytypowanych elementów jakimi były wirniki WP i SP w obszarze otworu centralnego zlokalizowanym w pobliżu pierwszego stopnia, obszary rowków termicznych uszczelnienia tych wirników, zidentyfikowane obszary w obrębie kadłuba wewnętrznego WP oraz zaworu odcinającego WP. Dobór elementów uznanych za krytyczne został przeprowadzony poprawnie. Stref wysokiego wyężenia materiału można w rozważanym przypadku wskazać co prawda więcej, do takich zapewne należy na przykład podstawa tarczy stopnia regulacyjnego po stronie wlotu pary. Trudno jednak oczekiwać, przy i tak szerokim zakresie prac podjętych przez Doktorantkę, szerszego niż przyjęte, spektrum analizowanych przypadków. Do wyznaczania naprężeń została wykorzystana metoda elementów skończonych W przypadku wyznaczania naprężeń termicznych w trybie online Doktorantka wykorzystwała funkcje wpływu w postaci funkcji Green'a oraz metodę superpozycji z wykorzystaniem całki Duhamel'a. Celem uwzględnienia wpływu zmienności współczynnika wnikania ciepła na dokładność prowadzonych obliczeń wykorzystana została idea zmodyfikowanej temperatury pary ze współczynnikami korekcyjnymi oraz podziałem okresu rozruchu na etapy. Przyjęty do prac zestaw metod obliczeniowych należy uznać za zaawansowany i bardzo pracochłonny.

W rozdziale szóstym Doktorantka przedstawiła zagadnienia związane z podejściem do filozofii remontowej turbin oraz diagnostyki materiałowej. Istotną część rozdziału poświęcona została badaniom laboratoryjnym związanym z określeniem temperatury przejścia krucho-plastycznego oraz odporności na kruche pękanie dla stali wirnikowej. Próbkę do tego celu pobrane zostały z tarczy stopnia regulacyjnego wycofanego z eksploatacji

wirnika turbiny po długotrwałej eksploatacji. Próbkę do tego celu pobrano w kierunku obwodowym i promieniowym, pod kątem określenia potencjalnej anizotropii własności badanego materiału. Stwierdzone różnice w tym zakresie okazały się niewielkie, możliwe do pominięcia.

Uniwersalną, stanowiącą podsumowanie przeprowadzonych badań, strategię dalszej eksploatacji i obsługi instalacji energetycznych włącznie z przykładami opracowanymi dla turbiny parowej oraz elementu krytycznego jakim jest wirnik części WP Doktorantka przedstawiła w rozdziale siódmym. Zaproponowane zostało tu wykorzystanie wskaźnika NPV, pozwalającego na określenie optymalnego czasu przeprowadzenia działań prewencyjnych. Prezentowane podejście zbudowane zostało o model obsługi oparty na ryzyku związanym z przewidywanym sposobem eksploatacji (liczbą godzin pracy, liczbą i charakterem rozruchów) oraz dobranymi wartościami naprężeń dopuszczalnych. W zaprezentowanym podejściu uwzględniony został aspekt ekonomiczny wynikający z przepływów pieniężnych powiązanych z prawdopodobieństwem awarii przed i po przeprowadzonej w określonym czasie inspekcji.

Cała rozprawa została skomponowana logicznie. Jej treść ułożona została w postaci zawartej w kolejnych rozdziałach sekwencji informacji wprowadzających czytelnika w kolejne aspekty rozważanego, kompleksowego problemu naukowego. Istotnymi jej walorami są: wysoki poziom zaawansowania przeprowadzonych rozważań, bardzo staranna redakcja (niewielka liczba usterek, czytelność formułowanych przemyśleń) oraz charakter aplikacyjny. Doktorantka przeprowadziła w ramach rozprawy zarówno zaawansowane obliczenia jak i badania laboratoryjne, wykazując swoje kompleksowe umiejętności i kompetencje. Przedstawione w ostatnim rozdziale podsumowanie stanowi dobrze przygotowaną syntezę jej treści oraz wyników. Przedstawione wnioski uważam za poprawne i trafne.

Strona redakcyjna rozprawy została oceniona w kolejnym rozdziale niniejszej opinii.

### **3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne**

Podkreślam raz jeszcze, że przygotowanie rozprawy, w której ujęto szczegółowy opis szeregu zaawansowanych zadań było zadaniem pracochłonnym i obarczonym ryzykiem pomyłek. Pomimo to liczba zauważonych przeze mnie usterek redakcyjnych w pracy jest naprawdę niewielka. Są to zazwyczaj drobne literówki, które zostały przeze mnie zaznaczone w ocenianym egzemplarzu pracy przekazanym Doktorantce do wykorzystania przy korekcie przed dalszymi publikacjami.

Przykładowe usterki redakcyjne wymieniam poniżej:

- Str. 80, ósma linia ostatniego akapitu, słowo „*równych*” należy, moim zdaniem, zastąpić słowem „*różnych*”;
- str. 123, druga linia nad rys. 5.61 „*W czasie monitorowanych 30 000 h*” – chodzi raczej o 30 000 minut, czyli 500 godzin pracy;
- str.124, ostatnia linia nad rys. 5.62, podobna usterka: 17 000 h – raczej 17 000 minut;
- str. 160, druga linia pod rys.7.1 słowo „*miedyrementowych*” zamiast „*międzyremontowych*”;
- Str.233, cytowana pozycja literatury nr 81 w ostatniej linii pojawia się słowo „*Inseccion*” zamiast „*Inspection*”.

Nie do końca klarowne są według mnie założenia opisane na stronie 68 rozprawy słowami „*We wszystkich scenariuszach założono, że w ciągu roku, blok uruchamiany jest 200 razy, a czas pracy pomiędzy kolejnymi odstawieniami wynosi 30 h, co daje łącznie 6000 h pracy na rok*”. Wynika z nich że: przyjęta liczba odstawień jest bardzo wysoka, co może wydawać się zgodne z oczekiwaniami, wskazując równocześnie na charakter eksploatacji turbiny w roli źródła szczytowego. Z drugiej strony tak duża liczba odstawień wskazuje na liczne wyłączenia codzienne oraz weekendowe (tych ostatnich przypuszczalnie mniej więcej 50). Trudno byłoby więc przewidywać w tak założonej sytuacji czas pracy pomiędzy kolejnymi odstawieniami dużo dłuższy niż kilkanaście godzin. Przypuszczam też że wskazana liczba 6000 godzin pracy w roku przy tak przyjętym sposobie eksploatacji wydaje się wyższa od oczekiwanej. Według danych ARE (Statystyka Elektroenergetyki Polskiej 2020) średnioroczna liczba odstawień dla opalanych węglem kamiennym bloków klasy 200 MW w latach 2019 i 2020 oscylowała w granicach 20 do 30. Dla bloków klasy 100 MW była nawet znacząco niższa. Średni roczny czas pracy dla opalanych węglem kamiennym bloków klasy 200 MW w roku 2019 był równy 4684 godziny, zaś w roku 2020 obniżył się do 3811 godzin. Nieco wyższe wartości rocznego czasu pracy odnotowano dla bloków opalanych węglem brunatnym. Średnioroczny czas pracy użytkowanych w latach 2019-2020 bloków klasy 100 MW opalanych węglem kamiennym był dużo niższy - równy odpowiednio 1982 godziny oraz 1298 godzin. Będę zobowiązany za szersze skomentowanie przez Doktorantkę wspomnianych założeń.

Doktorantka użyła w rozprawie zbyt lakonicznych podpisów pod niektórymi rysunkami. Często jest to co prawda połączone ze stosownym uzupełnieniem w tekście. Jestem jednak zdania, że spojrzenie na rysunek w trakcie przeglądania publikacji powinno dawać możliwość zinterpretowania jego treści bez konieczności poszukiwania i analizowania związanego opisu. Uwaga dotyczy na przykład rys.7.1. Treść podpisu: „*Przebieg ryzyka technicznego wirnika WP*”. Przy spojrzeniu bez analizy tekstu brak jest informacji o jaką turbinę chodzi. Inny przykład odnosi się do rys.6.11. Treść podpisu: „*Mikropróbki: surowa, po obróbce, po przeprowadzonej próbie*”. Powyżej widoczna jest fotografia trzech próbek ułożonych na tle fragmentu linijki od lewej do prawej. Po przyjrzeniu się zapewne oczywiste staje się, która z nich związana jest ze wskazanymi określeniami, ale pomimo to celowym byłoby zmodyfikowanie tego podpisu na przykład do formy: „*Mikropróbki, od lewej: surowa, po obróbce, po przeprowadzonej próbie*”

Nie do końca klarowny jest wykaz wykorzystanych w rozprawie oznaczeń. Autorka nie uzupełniła go o stosowane jednostki. Domyślnie powinny być to jednostki układu SI, ale ewentualnie również ich wielokrotności lub podwielokrotności. Niektóre wielkości są bezwymiarowe, niekiedy z komentarza w tekście nie wynika wprost interpretacja zastosowanych wielkości w przedstawionych formułach obliczeniowych. Taki przypadek dotyczy na przykład wzoru (5.10) na stronie 93 rozprawy, gdzie pojawia się współczynnik korygujący  $k$ , który zgodnie z komentarzem Doktorantki może przyjmować wartości stałe lub zmienne w czasie. Zgodnie z informacją podaną w tabeli 5.1 jest to wielkość bezwymiarowa, jeśli spojrzeć na postać równania (5.10) w którym ten współczynnik występuje, powinien mieć wymiar taki sam jak współczynnik wnikania ciepła.

#### **4. Ostateczna ocena pracy**

Do najważniejszych osiągnięć własnych Doktorantki w przedstawionej do recenzji pracy należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- opracowanie strategii eksploatacji użytkowanego w horyzoncie czasu przekraczającym założenia projektowe turbozespołu parowego na podstawie analizy kluczowych zagrożeń dla jego krytycznych komponentów, w szczególności wirnika;
- przygotowanie koncepcji optymalizacji rozruchu turbiny parowej opartej na wyznaczeniu krytycznych elementów opartej o dwa różne podejścia: optymalizację statyczną oraz dynamiczną;
- kompleksowe i wyjątkowo klarowne przedstawienie poruszanej w rozprawie problematyki.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne są nieliczne i w żaden nie podważają pozytywnej oceny rozprawy. Doktorantka zrealizowała przedstawiony w rozdziale 1.4 rozprawy cel pracy. Uważam, że należy podkreślić kompleksowy charakter, wysoki poziom, pracochłonność oraz użyteczny charakter przeprowadzonych badań.

Autorka rozprawy, mgr inż. Martyna Tomala, wykazała się głęboką wiedzą teoretyczną oraz praktyczną w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to jednoznacznie z jej treści.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autorka, mgr inż. Martyna Tomala wykazała umiejętność formułowania zadania naukowego, opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, kompleksową znajomość stanu osiągnięć w obszarach wiedzy związanych z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Martyny Tomali **pt.: „Dobór sposobów eksploatacji oraz planowanie badań diagnostycznych elementów turbin pracujących w elastycznych warunkach pracy w oparciu o analizę ryzyka”** spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Z uwagi na unikalne, moim zdaniem, walory rozprawy: wysoki jej poziom, zarówno merytoryczny jak i edytorski oraz kompleksowe ujęcie rozważanego problemu stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

