

Prof. dr hab. inż. Wojciech Sobieski
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
Wydział Nauk Technicznych
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
10-957 Olsztyn, ul. M. Oczapowskiego 11
e-mail: wojciech.sobieski@uwm.edu.pl
tel.: (89) 5-23-32-40 / fax: (89) 5-23-32-55



**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Mateusza Bryka pt.:
„Zaawansowana kontrola stanu łopatki promieniowej w trakcie
pozaprojektowych zmian obciążenia za pomocą narzędzi Thermal-FSI”.**

Podstawą prawną wykonania recenzji jest Umowa o Dzieło nr 8.07/D/2.

1. Tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora.

Podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora w aktualnym postępowaniu jest rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Mateusza Bryka pt.: „Zaawansowana kontrola stanu łopatki promieniowej w trakcie pozaprojektowych zmian obciążenia za pomocą narzędzi Thermal-FSI”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Janusz Badur, promotorem pomocniczym dr inż. Sylwia Kruk-Gotzman. Można uznać, że zawartość rozprawy jest adekwatna do jej tytułu.

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Mateusza Bryka pt. „Zaawansowana kontrola stanu łopatki promieniowej w trakcie pozaprojektowych zmian obciążenia za pomocą narzędzi Thermal-FSI” obejmuje łącznie 169 stron tekstu, z czego treść zasadnicza zajmuje 145 stron, a pozostałe strony zawierają: spis treści, podziękowania, streszczenia w języku polskim i angielskim, bibliografię, spis rysunków i tabel oraz jeden załącznik. Treść zasadnicza podzielona jest na 7 rozdziałów.

Rozdział 1 („Wstęp”) zawiera: wybrane informacje dotyczące funkcjonowania polskiej energetyki, ze szczególnym uwzględnieniem wyzwań związanych z nieprzewidywalnością i zmiennością pracy odnawialnych źródeł energii (OZE); przegląd zagadnień dotyczących zjawisk wytrzymałościowych występujących w turbinach parowych; przykłady uszkodzeń łopatek turbin; omówienie znaczenia i funkcji tzw. systemów ograniczeń termicznych turbiny oraz opis wybranych implementacji takich rozwiązań. Rozdział kończy się sformułowaniem dwóch celów oraz trzech tez rozprawy, a także krótkim omówieniem układu pracy, związku prowadzonych badań z dyscypliną inżynieria mechaniczna oraz zastosowanych metod badawczych.

Rozdział 2 („Model matematyczny dedykowany startom i odstawieniom urządzeń energetycznych”) przedstawia: rodzaje sprzężeń typu fluid-solid; zbiór równań bilansowych charakterystycznych dla solverów CFD i CSD oraz dyskusję dotyczącą hipotez wytrzymałościowych, w szczególności hipotezy Hubera-Misesa-Hencky’ego, zastosowanej później w badaniach.

W Rozdziale 3 („Weryfikacja modelu Thermal-FSI”) przedstawiono przykłady prac badawczych, w których zastosowano podejście Thermal-FSI.

Rozdział 4 („Walidacja modelu Thermal-FSI na podstawie rzeczywistej awarii stopnia promieniowo-osowego”) zawiera opis pomocniczego modelu symulacyjnego, służącego do potwierdzenia umiejętności Autora w zakresie wykonywania analiz Thermal-FSI. W kolejnych punktach opisano: geometrię stanowiącą podstawę analizy, proces generowania siatki – wraz z testem niezależności wyników od siatki, przedstawieniem warunków brzegowych analizy CFD i CSD – oraz wyniki uzyskane tymi solverami. Rozdział kończy się podsumowaniem, którego głównym punktem jest stwierdzenie, że opracowany model jest wiarygodny na poziomie co najmniej jakościowym.

Rozdział 5 („Określenie założeń konstrukcyjno-przepływowo-wytrzymałościowych do analizy Thermal-FSI pozaprojektowych zmian obciążenia łopatki promieniowej”) zawiera cztery propozycje doprowadzenia pary chłodzącej w okolice wlotu pary świeżej turbiny reakcyjnej WP/SP, w celu ochłodzenia łopatek i zmniejszenia w nich naprężeń termicznych. Po wstępnej analizie Autor wybrał rozwiązanie nr 4, dla którego zaproponował trzy warianty kolektorów doprowadzających parę chłodzącą. Ważnym elementem przygotowania modeli numerycznych było oszacowanie luzów występujących w miejscu mocowania łopatki w korpusie. W kolejnych punktach przedstawiono: geometrię zastosowaną w modelu, badanie niezależności wyników od gęstości siatki oraz analizę doboru ciśnienia pary chłodzącej – wykonano po pięć symulacji dla każdego wariantu kolektora. Końcowa część rozdziału zawiera liczne wizualizacje wyników symulacji numerycznych.

Rozdział 6 („Analizy Thermal-FSI pozaprojektowych zmian obciążenia łopatki promieniowej”) przedstawia badania numeryczne przeprowadzone dla dwóch wariantów geometrii: referencyjnej i zmodyfikowanej. Autor skrótowo opisuje modele symulacyjne CFD i CSD, a następnie prezentuje wyniki analiz CFD dla pięciu wariantów przyspieszonego rozruchu/odstawienia turbiny. W pierwszym wariancie nie zastosowano chłodzenia parą, natomiast w kolejnych stopniowo zwiększano różnicę temperatur między parą chłodzącą a parą świeżą. Wyniki analiz CSD dla tych samych przypadków przedstawiono w dalszej części rozdziału. Oba typy analiz – CFD i CSD – zakończono odrębnymi podsumowaniami. Ostatni element rozdziału stanowi dyskusja dotycząca luzów pomiędzy elementami konstrukcyjnymi turbiny oraz całościowe podsumowanie opisanych w tym rozdziale badań.

Rozdział 7 („Wnioski”) stanowi podsumowanie rozprawy. Autor przypomniał tam tezy pracy oraz zawarł siedem obszernych komentarzy. Komentarz nr 6 odnosi się do drugiego celu pracy oraz tezy trzeciej. Komentarz nr 7 przedstawia najbardziej obiecujące kierunki rozwoju modelowania układów będących tematem recenzowanej rozprawy doktorskiej.

3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Bibliografia rozprawy jest obszerna (zawiera 124 pozycje, w tym około 30 opublikowanych w ostatnich 5-ciu latach), zróżnicowana i obejmuje zarówno literaturę krajową, jak i zagraniczną, publikacje naukowe, materiały konferencyjne, raporty branżowe oraz źródła internetowe. Źródła są aktualne, a wiele z nich dotyczy bezpośrednio problematyki analiz Thermal-FSI i zagadnień związanych z turbinami parowymi i gazowymi.

W pracy widać staranność w doborze literatury, jednak część pozycji jest opisana niejednorodnym stylem bibliograficznym, zdarzają się brakujące nazwiska, tytuły lub niejednolite formatowanie nazw czasopism i wydawnictw. Mimo tych drobnych niedociągnięć, bibliografia w pełni spełnia swoją funkcję merytoryczną, umożliwiając odwołanie się do istotnych źródeł i potwierdzenie omawianych zagadnień.

4. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata

Autor wskazał dwa cele badań (str. 38):

1. Analiza możliwości przeprowadzenia przyspieszonego rozruchu i odstawienia turbiny ze stopniem promieniowo-osowym za pomocą kontrolowanego wtrysku pary chłodzącej przy zachowaniu poziomym naprężenia i odkształcenia na bezpiecznym poziomie.
2. Propozycja algorytmu zaawansowanego BOTTa, który uwzględni wpływ naprężenia termicznego na stopień promieniowy.

Oba cele odnoszą się do aktualnych wyzwań sektora energetycznego, w szczególności do rosnącej potrzeby elastycznej reakcji jednostek wytwórczych na dynamiczne zmiany obciążenia, wynikające z niestabilnego charakteru produkcji energii z odnawialnych źródeł (OZE). Zostały sformułowane w sposób przejrzysty i logiczny – pierwszy ma charakter bardziej naukowo-analityczny, drugi zaś praktyczno-aplikacyjny. Autor podkreśla, że ich realizacja wymaga wykorzystania zaawansowanych metod obliczeniowych z zakresu sprzężonych analiz termiczno-strukturalnych (Thermal-FSI). Cele te są spójne z tytułem rozprawy oraz z zagadnieniami omówionymi we wcześniejszych częściach Wstępu, stanowiąc solidną podstawę do dalszych rozważań badawczych. Dodatkowo Autor sformułował trzy tezy badawcze, które zostały przedstawione w sposób poprawny i są spójne z założonymi celami pracy.

5. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Pierwszym ważnym elementem rozprawy – wprowadzającym do dalszej jej części – są wyniki analiz zaprezentowane w Rozdziale 4. Pomimo braku ilościowych danych walidacyjnych, potwierdzają one, że podejście Thermal-FSI może być skutecznie wykorzystywane do analizy zachowania złożonych układów, takich jak elementy turbiny na stopniu promieniowo-osowym – przynajmniej na poziomie jakościowym. Przeprowadzone badania dowodzą również, że Autor opanował zarówno zaawansowaną wiedzę teoretyczną, jak i praktyczne umiejętności w zakresie modelowania zjawisk cieplno-strukturalnych typu sprzężonego.

Główna część badań rozpoczyna się w Rozdziale 5, w którym Autor rozważa różne możliwości doprowadzenia pary chłodzącej w okolice wlotu pary świeżej do turbiny reakcyjnej WP/SP, w celu ochłodzenia łopatek i zmniejszenia występujących w nich naprężeń termicznych. Autor przeprowadził szereg symulacji numerycznych dla jednej wybranej koncepcji doprowadzania pary, trzech wariantów geometrii kolektora oraz pięciu wartości ciśnienia w kolektorze. Tak przyjęty plan eksperymentu należy uznać za wystarczający i adekwatny do tego etapu badań. Na podstawie uzyskanych wyników Autor określił, który wariant kolektora okazał się najkorzystniejszy pod względem przepływowym oraz pod kątem redystrybucji temperatury na powierzchni łopatki. Na podstawie zbiorczych wyników dla tego wariantu ustalił również optymalną wartość ciśnienia w kolektorze względem ciśnienia pary świeżej. Uzyskane wyniki – mimo że dotyczą jednego z wielu możliwych rozwiązań (co Autor sam zauważa) – dają wyobrażenie o praktycznych możliwościach zastosowania pary chłodzącej do redukcji naprężeń termicznych w łopatkach turbin reakcyjnych WP/SP.

Rozdział 6 przedstawia realizację podstawowego celu pracy oraz potwierdza tezy nr 1 i 2. Cel ten został osiągnięty na podstawie serii symulacji numerycznych – najpierw CFD, a następnie CSD – przeprowadzonych dla pięciu wariantów rozruchu/odstawienia turbiny (z czego wariant pierwszy stanowi model referencyjny, bez chłodzenia łopatki parą). Przyjętą liczbę wariantów należy uznać za odpowiednio dobraną do założonego celu. W przypadku analizy CSD Autor poprawnie uzasadnił sposób zbierania i obróbki wyników (odmienny niż w Rozdziale 4). Uzyskane wyniki analiz są zgodne z ogólnymi przewidywaniami – im wyższa wartość i krótszy czas wymuszenia termicznego, tym gorsze warunki eksploatacyjne. Przeprowadzone przez Autora symulacje dały również dostęp do danych ilościowych, pozwalając uchwycić szczegóły reakcji wybranych elementów turbiny na zmienne warunki pracy. Szczególnie wartościową częścią badań są zamieszczone w punkcie 6.5 wykresy zmian naprężeń w czasie, z których jasno wynika, że chłodzenie parą może prowadzić do istotnej redukcji naprężeń w łopatkach turbiny. Autor wykazał, że istnieją pewne optymalne zakresy parametrów, a zbyt intensywne chłodzenie (w pracy był to przypadek dla $\Delta T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) może prowadzić nawet do wzrostu naprężeń i pogorszenia warunków pracy w porównaniu z warunkami referencyjnymi (przy czym lokalizacja ekstremów naprężeń jest inna). Stwierdził również, że w niektórych przypadkach chłodzenie skutecznie łagodzi naprężenia osiowe w krytycznym obszarze mocowania łopatki do kadłuba wewnętrznego, ale jednocześnie zauważa się zwiększenie naprężeń w innych częściach łopatki – szczególnie na powierzchniach pióra. Wartościowym uzupełnieniem badań jest dyskusja dotycząca luzów występujących na połączeniu łopatka-korpus i ich analiza w kontekście zmiennych warunków pracy turbiny. Ostatnim elementem tego etapu badań są związane wnioski – poprawnie sformułowane i spójne z informacjami przedstawionymi w całym rozdziale – a także wskazówki praktyczne, mogące stanowić punkt wyjścia do opracowania konkretnych rozwiązań wdrożeniowych.

Ostatnim, zamykającym elementem rozprawy jest Rozdział 7 („Wnioski”), w którym Autor podsumowuje wyniki swoich badań, opatrując je odpowiednimi komentarzami. Przedstawione wnioski są trafne i spójne z treścią pracy. Rozdział zawiera również odniesienie do drugiego celu rozprawy oraz tezy nr 3. Odniesienie to jest jednak dość skromne i może pozostawiać pewien niedosyt, zwłaszcza w kontekście obszernego, dziesięciostronicowego wprowadzenia dotyczącego systemów ograniczeń termicznych turbiny, które sugerowało większe rozwinięcie tego wątku. Mimo to główny zakres badań,

zaprezentowany w logicznym układzie rozdziałów 4, 5 i 6, jest na tyle szeroki i szczegółowy, że całościowo rozprawa sprawia wrażenie kompletnej i spójnej.

6. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników

Przeprowadzone w rozprawie badania mają istotny potencjał aplikacyjny. Zidentyfikowane mechanizmy redukcji naprężeń termicznych w łopatkach promieniowo-osiowych mogą znaleźć bezpośrednie zastosowanie w projektowaniu i modernizacji bloków energetycznych, szczególnie w kontekście rosnącego udziału odnawialnych źródeł energii i związanej z tym potrzeby częstych i szybkich zmian obciążenia turbin. Wyniki symulacji numerycznych mogą stanowić punkt wyjścia do opracowania algorytmów sterowania procesami rozruchu i odstawiania turbin oraz do stworzenia systemów ograniczeń termicznych nowej generacji. Mogą one także wspierać rozwój narzędzi diagnostycznych i prognostycznych, służących bezpiecznej i elastycznej eksploatacji bloków energetycznych.

7. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

Tytuł rozprawy „Zaawansowana kontrola stanu łopatki promieniowej w trakcie pozaprojektowych zmian obciążenia za pomocą narzędzi Thermal-FSI” nie jest w pełni spójny z jej treścią. Można go zaakceptować, jednak zamiast słowa „kontrola” bardziej adekwatne byłoby „analiza”. Słowo „kontrola” kojarzy się bowiem raczej z obserwacją stanu faktycznego i sugeruje zupełnie inną – diagnostyczną – strategię wykorzystania analiz numerycznych, np. pomiar rzeczywistej temperatury w wybranych punktach obiektu, przyjęcie tych wartości jako warunków brzegowych modelu numerycznego, a następnie wykonanie symulacji, której wynikiem byłaby ocena poziomu naprężeń i stopnia zagrożenia uszkodzeniem obiektu. Kolejną niedoskonałością tytułu jest to, że koncentruje się on na pozaprojektowych zmianach obciążenia, podczas gdy w rozprawie głównie poszukuje się rozwiązań konstrukcyjnych umożliwiających ograniczenie naprężeń, gdy takie zmiany nastąpią. Przykład bardziej adekwatnego tytułu: „Analiza możliwości redukcji naprężeń termicznych łopatki promieniowej w warunkach pozaprojektowych zmian obciążenia z wykorzystaniem narzędzi Thermal-FSI”.

W tytule Rozdziału 3 użyto terminu „weryfikacja”, podczas gdy treść koncentruje się na wykazaniu, że model Thermal-FSI dobrze odwzorowuje rzeczywistość, co – zgodnie z definicją – stanowi walidację. Dodatkowo w ostatnim akapicie tego rozdziału, będącym podsumowaniem, Autor używa już właściwego określenia „walidacja”, co powoduje niespójność terminologiczną między tytułem a zawartością rozdziału. W rozdziale zatytułowanym „Weryfikacja ...” należałoby się spodziewać serii testów numerycznych, których celem jest potwierdzenie poprawności implementacji modelu – przykłady takich testów to: badanie niezależności wyników od zagęszczenia siatki; sprawdzenie poprawności implementacji warunków brzegowych i początkowych (w tym np. wpływu sposobu inicjalizacji na czas obliczeń); ocena poprawności wymiany danych między solverami (istotna w kontekście zastosowanego w rozprawie podejścia); raportowanie zmian charakterystycznych wielkości fizycznych i stopnia zbilansowania masy, pędu czy energii; analiza wpływu zastosowanych schematów numerycznych i kroku czasowego (jeśli analiza jest niestacjonarna); analiza zbieżności obliczeń. Okazuje się, że część z tych elementów została przedstawiona w kolejnym rozdziale, zatytułowanym „Walidacja

...”, co nie jest zgodne z definicją tego pojęcia i dodatkowo pogłębia niespójność terminologiczną. Tytuły rozdziałów koncentrujące się na terminach „weryfikacja” i „walidacja” nie są trafnym wyborem – sugeruje się Autorowi zapoznanie z powszechnie stosowanym schematem IMRAD, który jasno określa sposób strukturyzowania opisu badań naukowych.

Rozdział 3, który jest bardzo krótki, nie zawiera oryginalnych wyników, lecz opiera się na danych literaturowych i stanowi próbę wykazania, że podejście Thermal-FSI może być skuteczne w modelowaniu złożonych układów typu fluid-solid. Tego rodzaju treść, mająca na celu uzasadnienie wyboru metody badawczej i wskazanie jej potencjału, powinna raczej zostać włączona do Wstępu (Rozdziału 1) jako kontekst dla dalszych, autorskich analiz.

W pracy brakuje ogólnego wprowadzenia do metodyki badań – nie przedstawiono jasno takich elementów, jak: założenia badawcze, zmienne wejściowe i wyjściowe, zakres analiz, sposób przeprowadzenia obliczeń oraz kryteria oceny wyników. Na podstawie szczątkowych informacji można jedynie wywnioskować, że część symulacji miała charakter parametryczny (str. 61), część prowadzono w trybie stacjonarnym (str. 60), a część – w trybie niestacjonarnym (str. 61). Autor w wielu miejscach założył, że jego poczynania i stosowana terminologia są oczywiste i nie wymagają komentarza, co w szerszym kontekście nie jest korzystne dla czytelników.

Ponieważ analiza Thermal-FSI nie jest standardową ani powszechnie znaną techniką modelowania numerycznego, należałoby wyjaśnić wszystkie kluczowe koncepcje. W rozprawie brakuje dokładnego opisu sposobu podziału geometrii na strefy oraz wskazania, które z nich przypisano do konkretnych solverów. Na rys. 43-45 nie zaznaczono, które elementy geometrii analizowane są za pomocą solvera CFD, a które za pomocą CSD, ani gdzie znajduje się interfejs wymiany danych między nimi. Dopiero w podrozdziale 4.6 wyjaśnia się, że solver CFD został zastosowany zarówno do analizy strefy płynu, jak i korpusu, natomiast solver CSD – do analizy samej łopatki. Choć takie podejście wydaje się logiczne, w pracy brakuje wyraźnego fragmentu, który jednoznacznie by tę kwestię wyjaśniał. W tym kontekście niejednoznaczne może być również pojęcie „domeny płynu”, które można rozumieć zarówno dosłownie – jako obszar wypełniony płynem – jak i formalnie, jako strefę, w której zastosowano Metodę Objętości Skończonych.

Pewną niedoskonałością rozprawy jest brak wyjaśnienia wszystkich symboli matematycznych pojawiających się w tekście (przykłady wskazano w uwagach szczegółowych). Dobrym rozwiązaniem byłoby zamieszczenie klasycznego spisu oznaczeń i skrótów, który często występuje w dużych opracowaniach naukowych.

W końcowej części Rozdziału 5 występuje chaos w numeracji rysunków i odwołaniach do nich, co utrudnia lekturę – czytelnik musi samodzielnie domyślać się, do którego rysunku odnosi się dany fragment komentarza.

Tytuł Rozdziału 5 („Określenie założeń konstrukcyjno-przepływowo-wytrzymałościowych do analizy Thermal-FSI pozaprojektowych zmian obciążenia łopatki promieniowej”) nie jest sformułowany

poprawnie i adekwatnie do treści. Tytuł tego rozdziału mógłby brzmieć np. „Analiza możliwości redukcji naprężeń termicznych w łopatkach turbin reakcyjnych”.

W Rozdziale 6 brakuje odpowiedniego komentarza wprowadzającego, co czyni go najsłabiej opracowanym fragmentem rozprawy (szkoda, bo jest to kluczowy element całej rozprawy). Pierwsze zdanie jedynie informuje, że rozdział opisuje docelowe analizy Thermal-FSI, jednak aby zrozumieć, czego one dotyczą, czytelnik musi cofnąć się do podrozdziału 1.3 i samodzielnie odnaleźć stosowną treść. Podrozdział 6.1 rozpoczyna się od rysunku, co jest nieprawidłowe – brakuje zarówno komentarza wprowadzającego, jak i odniesienia do tego rysunku w tekście, co należy uznać za uchybienie formalne. Następnie od razu przedstawiono szczegóły techniczne dotyczące kroku czasowego symulacji; choć można domyślić się intencji Autora, taki sposób prezentacji jest wysoce nieprofesjonalny. Opis modelu dyskretnego w punkcie 6.2 jest skrótowy i niepełny, a odbiór dodatkowo utrudnia odwołanie do nieistniejącego podrozdziału 3.2.2. Zdecydowanie brakuje komentarza dotyczącego rys. 94, który jest bardzo istotny dla omawianego w tej części rozprawy etapu badań. Co więcej, rysunek ten jest całkowicie nieczytelny ze względu na zastosowanie bardzo podobnych kolorów dla różnych serii danych. W legendzie występują zarówno linie grube, jak i cienkie, jednak na samym rysunku wszystkie linie są bardzo grube, co uniemożliwia ich rozróżnienie.

Przedstawione uwagi odnoszą się przede wszystkim do opisu badań, a nie do ich treści merytorycznej, i nie obniżają istotnie jakości naukowej rozprawy. Ich celem jest zwrócenie Autorowi uwagi na fakt, że nawet najlepsze badania tracą na odbiorze i znaczeniu, jeśli nie są odpowiednio i zgodnie z powszechnie przyjętymi zasadami przedstawione. Poniżej zamieszczono uwagi uzupełniające.

Uwagi szczegółowe:

1. W pracy występuje dość wiele błędów edytorskich, choć sam język jest poprawny, a zdania na ogół dobrze się czyta.
2. Autor nie wypracował jednolitego stylu zapisu sprzężenia termicznego typu Fluid-Solid – w rozprawie występują różne warianty: „Thermal-FSI”, „Thermal – FSI”, „Thermal - FSI”, „Thermal FSI”, „FSI-Thermal”, „thermal – FSI” oraz „thermal FSI”.
3. Str. 11: Co dokładnie oznacza termin „rezerwa wirująca”?
4. Str. 8 i kolejne: Brak konsekwencji w stosowaniu spacji przed jednostkami wielkości fizycznych.
5. Str. 15: Co oznaczają skróty „Posiag.” oraz „Posiag./min.” widoczne w Tabeli 1?
6. Str. 17: Przy stosowaniu skrótów, np. WP, SP, PSE, warto za pierwszym razem podać pełną nazwę. Wyjaśnienie części z nich pojawia się dopiero na str. 26, po wielokrotnym ich wcześniejszym użyciu.
7. Str. 17-18: Rysunki turbin są zbyt małe, aby można było dostrzec szczegóły konstrukcji.
8. Str. 18: Błąd w odwołaniu do rysunku („załączono rysunek 3.2”).
9. Str. 19: Zamiast „st. C” powinno być użyte „°C” – zapis „st. C” ma charakter potoczny i nie jest zalecany w pracach naukowych.
10. Str. 19: Zdanie „W przypadku turbiny poddawanej analizie...” pojawia się przed przedstawieniem celów i zakresu pracy, co zaburza logiczny porządek tekstu.

11. Str. 19: Formy typu „... mamy ...” (liczba mnoga) nie powinny być stosowane w pracach naukowych, ponieważ nie jest jasne, kto jest podmiotem – autor, promotor, czytelnik, środowisko naukowe czy inżynierskie.
12. Str. 20: Podpis pod rysunkiem 14 znajduje się na kolejnej stronie, co utrudnia czytanie.
13. Str. 21: O jakich patentach mowa? Skoro autor powołuje się na konkretne patenty, to należało podać ich numery.
14. Str. 23-24: Słowo „zmielone” jest nieadekwatne – lepiej byłoby „oderwane i zniekształcone”.
15. Str. 29: Rysunek 29 nie przedstawia algorytmu, jak sugeruje podpis.
16. Str. 40: Sformułowanie „różne możliwości strumienia pary chłodzącej” jest nieprecyzyjne i należy je poprawić.
17. Str. 42: Tytuł rozdziału powinien być bardziej ogólny, gdyż przedstawione równania to głównie ogólne równania bilansowe charakterystyczne dla zastosowanych metod numerycznych. Dopasowanie ich do analizowanego przypadku polega głównie na opisie warunków brzegowych, który stanowi niewielką część rozdziału.
18. Str. 43: Symbole użyte w równaniach nie zostały opisane.
19. Str. 43: Zastosowanie rysunku zawierającego numerowane równania jest nietypowe; element ten powinien być oznaczony jako tabela.
20. Str. 43-44: Opis idei jednostronnego sprzężenia poprzez pole temperatury lub pole ciśnień podany jest dwukrotnie, co jest zbędne.
21. Str. 44: Autor odnosi się do powierzchni θ_2 , która nie została opisana ani zaznaczona na rysunku 40, do którego odsyła czytelnika.
22. Str. 48: Zastosowanie zdania kończącego się dwukropkiem, po którym następuje podrozdział, jest niezgodne z zasadami pisania prac naukowych.
23. Str. 49: Znaczenie symboli kluczowych dla dyskusji, tj. Φ_v oraz Φ_f , nie zostało podane (wyjaśnienie pojawia się dopiero pod koniec str. 50).
24. Str. 51: „... model turbulencji STT ...” – czy chodzi o model k- ω SST?
25. Str. 52 i 54: Autor opisuje kryterium wytrzymałościowe Tsai-Wu, które nie zostało omówione w części matematycznej rozprawy. Warto byłoby dodać cytowanie i wskazać źródło opisujące to kryterium.
26. Rys. 57: Na rysunku 43 powinno być wskazane, które strefy przypisano solverowi CFD, a które solverowi CSD.
27. Str. 58: Wyjaśnienie potrzeby zamiany przestrzeni ciągłej na dyskretną powinno znaleźć się w Rozdziale 3, gdzie przedstawiono równania matematyczne.
28. Str. 58: Zdanie „Aby zdyskretyzować domenę płynu w programie Fluent...” sugeruje, że domenę ciała stałego nie trzeba dyskretyzować. Ponadto, skoro Autor wyjaśnia potrzebę dyskretyzacji domeny płynu na objętości skończone, to należałoby analogicznie omówić konieczność podziału domeny ciała stałego na elementy skończone.
29. Str. 59: Wyrażenie „badanie niezależności siatki” jest niepoprawne – to nie siatka ma być niezależna, lecz wyniki obliczeń.
30. Str. 59: W jaki sposób oceniano stabilizację wyników?
31. Str. 60: Dwukrotne użycie koloru niebieskiego na rysunku 46 utrudnia interpretację danych.
32. Str. 60: W tekście wspomina się o badaniach parametrycznych, lecz nie podano żadnych szczegółów: nie określono parametrów wejściowych i wyjściowych ani liczby wariantów.

33. Str. 61: Co oznacza określenie „śruby płaszczyzny połączenia”?
34. Str. 68: „... przedstawia pola osiowych przemieszczeń u_{au} ...” – brak wyjaśnienia zastosowanej symboliki.
35. Str. 68: Lista punktowana a)-i) jest zbędna, ponieważ te informacje znajdują się w podpisie pod rysunkiem 57.
36. Str. 65: Tytuł rozdziału zawiera błędy językowe.
37. Str. 79: Dlaczego opisana metoda szacowania luzów nie została zastosowana w poprzednim rozdziale?
38. Str. 80: Brak wyjaśnienia znaczenia symboli i indeksów użytych w równaniach (5.1)-(5.3).
39. Str. 85: W rozprawie nie ma rozdziału 3.2.1, do którego jest odniesienie.
40. Str. 85: Zdanie „Dyskretyzacja została przeprowadzona zgodnie z teorią Metody Objętości Skończonych (MOS).” jest nieprecyzyjne; teoria MOS nie dotyczy generacji siatki, więc poprawniej byłoby napisać „... zgodnie z wymaganiami Metody Objętości Skończonych”.
41. Str. 86: „Z uwagi na fakt, iż metodologia tego badania została szczegółowo omówiona w rozdziale 2.1 ...” – nie jest jasne, dlaczego Autor uznaje, że treść rozdziału 2.1 odnosi się bezpośrednio do omawianego badania (czy zatem oznacza to, że rozdział 2.1 nie ma zastosowania w rozdziale 4?). Ponadto warto podkreślić, że termin „metodologia” odnosi się do nauki o metodach badawczych, natomiast opis przyjętego sposobu postępowania badawczego powinien być określony mianem „metodyki”.
42. Str. 86: Rozdział 5.6 nie zawiera analizy niezależności siatki – brakuje wyników oraz opisu sposobu uzyskania kompromisu, o którym wspomina Autor. Nie jest także jasne, która siatka została wybrana do dalszych analiz.
43. Str. 87: „Siatka numeryczna wykorzystywana w obliczeniach CFD składa się z 2,3 objętości skończonych, co zapewnia odpowiednią rozdzielczość w obszarach o istotnych gradientach przepływu.” – sformułowanie jest niejasne i wymaga doprecyzowania.
44. Str. 87: Niejasne jest zamieszczenie tabeli przypadków, skoro wartości temperatur w każdym wariancie są identyczne.
45. Str. 87: Dlaczego Autor twierdzi, że stan pracy turbiny był ustalony, skoro zastosowano zmienną w czasie krzywą rozruchową?
46. Str. 88: W przypadku stwierdzeń o najlepszym wyniku należy podać zastosowane kryteria oceny.
47. Str. 88: Odwołania do rysunków są niepoprawne – nawet jeśli przyjąć, że Autor opisuje rysunki umieszczone później w rozdziale, to treść opisu nie odpowiada ich zawartości. Pierwsze trzy rysunki (83-85) rzeczywiście przedstawiają linie wysnute, jednak kolejne ilustracje dotyczą pól temperatury, a nie pól prędkości, które omawiane są w następnym akapicie.
48. Str. 101: Umieszczanie rysunków w taki sposób, aby przeglądać je od prawej do lewej strony, jest nietypowe i utrudnia odbiór.
49. Str. 121: Skoro mowa o osiach układu współrzędnych, to powinny one być wyraźnie zaznaczone na prezentowanych rysunkach.
50. Str. 121: Sformułowanie „na załączonym rysunku” jest nieprecyzyjne – w pracach naukowych każdorazowo należy podawać numer rysunku. W omawianym przypadku powoduje to niejasność, ponieważ na widocznym na tej samej stronie rysunku brakuje oznaczeń „4” i „5”.

51. Str. 122: Zdanie „Pióro g. oznacza część nadciśnieniową pióra łopatki, zaś pióro d. część podciśnieniową pióra łopatki” jest niepoprawne stylistycznie i logicznie, gdyż pióro jest częścią pióra.
52. Str. 140: Tytuł „Kasacja luzów” sugeruje, że luzy będą wyłącznie zmniejszane, co nie odpowiada rzeczywistości – lepszym tytułem byłby np. „Analiza luzów w zmiennych warunkach pracy”.
53. Str. 140: Nie jest jasne, w jaki sposób z danych symulacyjnych wyznaczana jest wartość ΔL przedstawiana na rysunkach zamieszczonych w tej części pracy.
54. Str. 146: Dlaczego wartości na wykresach 136-138 są dodatnie, skoro wcześniej ten sam parametr miał niemal wyłącznie wartości ujemne? Przysłałaby się jednoznaczna definicja wielkości widocznej na osi Y.
55. Str. 150: Autor wielokrotnie podkreśla słuszność dokonanych przez siebie wyborów – zasadniczo takie oceny powinny pozostawać w gestii czytelników, a nie samego Autora.
56. Str. 151: Co oznacza sformułowanie „olbrzymia zbieżność”?

Ponieważ odniesienie się do wszystkich uwag szczegółowych nie jest zasadne, proszę Autora o wyjaśnienie tylko wybranych kwestii:

1. Które symulacje miały charakter stacjonarny, a które niestacjonarny? Jakie kryteria przyjęto przy wyborze rodzaju analizy numerycznej?
2. Jak dokładnie definiowany jest parametr przedstawiony na osi Y rysunków 136-138 oraz dlaczego wartości tego parametru są tam dodatnie, podczas gdy wcześniej parametr o tej samej nazwie (kasacja luzu) w większości przypadków przyjmował wartości ujemne?
3. W pracy wydaje się, że na pewnym etapie zrezygnowano z rozwinięcia tematu dotyczącego systemów ograniczeń termicznych turbiny – czym to było spowodowane?

8. Ocena, czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Rozprawa niewątpliwie stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie modelowania i optymalizacji chłodzenia turbin reakcyjnych, łącząc zaawansowane metody symulacyjne z praktycznym podejściem do oceny wpływu parametrów chłodzenia na warunki eksploatacyjne. Praca cechuje się spójnością, logicznym układem oraz trafnością wniosków, co potwierdza jej wysoką wartość naukową.

W szczególności oryginalność rozwiązania polega na:

- zaproponowaniu i zbadaniu różnych wariantów doprowadzenia pary chłodzącej do turbiny reakcyjnej WP/SP wraz z analizą wpływu geometrii kolektora oraz ciśnienia pary na efektywność chłodzenia,
- szczegółowej analizie wpływu chłodzenia parą na naprężenia termiczne w łopatkach turbiny w różnych wariantach rozruchu/odstawienia, w tym wykazaniu istnienia optymalnych parametrów chłodzenia oraz potencjalnych skutków niekorzystnych przy nadmiernym chłodzeniu,
- uwzględnieniu w badaniach zagadnienia luzów na połączeniu łopatka-korpus, co świadczy o kompleksowym podejściu do tematu i uwzględnieniu realnych warunków eksploatacyjnych.

9. Ocena, czy rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej

Przedstawiona rozprawa świadczy o tym, że Kandydat posiada szeroką wiedzę teoretyczną z zakresu inżynierii mechanicznej, obejmującą zarówno podstawy mechaniki płynów i mechaniki ciała stałego, jak i zaawansowane zagadnienia dotyczące modelowania zjawisk cieplno-strukturalnych typu sprzężonego. Autor wykazuje dużą biegłość w opracowywaniu modeli numerycznych z obszaru Thermal-FSI oraz umiejętność planowania i realizacji badań naukowych. Elementy te potwierdzają dojrzałość naukową Kandydata oraz jego kompetencje i przygotowanie do samodzielnej pracy badawczej.

10. Opinia końcowa

Podsumowując recenzję rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Mateusza Bryka pt.: „Zaawansowana kontrola stanu łopatki promieniowej w trakcie pozaprojektowych zmian obciążenia za pomocą narzędzi Thermal-FSI”, stwierdzam, że:

1. Uzyskane przez Kandydata wyniki mają istotną wartość poznawczą w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna, wnosząc oryginalne elementy do badań nad modelowaniem procesów termomechanicznych w turbinach parowych.
2. Przedstawiony materiał świadczy o dobrym przygotowaniu teoretycznym Kandydata oraz o jego wysokich umiejętnościach w zakresie praktycznego wykorzystywania zaawansowanego oprogramowania komercyjnego, takiego jak ANSYS Workbench, ANSYS Fluent, ANSYS Mechanical oraz ANSYS System Coupling.
3. Kandydat wykazał się dojrzałością badawczą, potwierdzając tym samym gotowość do samodzielnego prowadzenia badań naukowych w przyszłości.

Wobec powyższego stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Mateusza Bryka pt.: „Zaawansowana kontrola stanu łopatki promieniowej w trakcie pozaprojektowych zmian obciążenia za pomocą narzędzi Thermal-FSI” spełnia wymagania w sensie Art. 187. Ustawy z dnia 20 lipca 2018 o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z dn. 20.04.2023 r. poz. 742 ze am.) i **może stanowić podstawę do przeprowadzenia publicznej obrony.**

Sobieski

26 sierpnia 2025

