

Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgr inż. Mateusza Bryka
" Zaawansowana kontrola stanu łopatk promieniowej w trakcie
pozaprojektowych zmian obciążenia za pomocą narzędzi Thermal
– FSI"

Promotor rozprawy: Prof. dr hab. inż. Janusz Badur,
Promotor pomocniczy: dr inż. Sylwia Kruk – Gotzman

Podstawą formalną opracowania recenzji jest prośba o jej wykonanie w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych mgr inż. Mateusza Bryka w piśmie z dnia 10.07.2025 r.

A. OCENA TEMATYKI PODJĘTYCH BADAŃ

W roku 2019 Rada Europejska przyjęła ograniczenie emisji netto gazów cieplarnianych do roku 2030 o co najmniej 55% w odniesieniu do roku 1990. Dwa lata później w Polsce został przedstawiony plan transformacji energetycznej pod nazwą Polityka Energetyczna Polski 2040. W zatwierdzonych do realizacji planach wskazano między innymi na założony wzrost mocy zainstalowanej w fotowoltaice oraz w energetyce wiatrowej. Już obecnie w Polsce zainstalowane jest ok. 10,9 GW w farmach wiatrowych oraz ok. 21,8 GW w fotowoltaice co w sumie stanowi około połowę całej mocy zainstalowanej w polskim systemie elektroenergetycznym. Tak intensywny rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE), które charakteryzują się dużą zmiennością generowanej mocy czynnej musi być powiązany z modyfikacją bardziej przewidywalnych źródeł energii oraz budową magazynów energii dużej mocy. Na konwencjonalnych blokach węglowych zostało wymuszone gwałtowne zmniejszenie lub zwiększenie obciążenia w zależności od dostępności energii z OZE.

W dostępnej literaturze można znaleźć wiele prac poświęconych analizie stanu cieplno-wytrzymałościowego w elementach krytycznych kotła oraz turbiny parowej podczas procesów ich rozruchu lub odstawiania. Blok Ograniczeń Termicznych to układ monitorujący naprężenia w turbinie akcyjnej 200 MW, który ma na celu ochronę kluczowych jej elementów przed nadmiernym obciążeniem termicznym. Działanie systemu opiera się na analizie prędkości przyrostu temperatury oraz różnicy temperatur między metalowymi elementami turbiny a czynnikiem roboczym. Na podstawie wyliczonego zapasu naprężeń układ ten kontroluje prędkość przyrostu mocy turbiny. Jeśli zapas naprężeń osiąga wartość zerową system zatrzymuje proces zwiększania obciążenia turbiny, uniemożliwiając dalsze otwieranie zaworów, aż do momentu ponownego zwiększenia zapasu naprężeń. Zaproponowane rozwiązanie oparte jest jednak na wielu założeniach upraszczających takich jak przyjęcie określonej wartości współczynnika przejmowania ciepła, wybranej lokalizacji analizowanego naprężenia krytycznego czy liniowej analizie termosprężystości. Z tego powodu znane są przypadki awarii turbin na stopniu promieniowo-osłupowym pomimo wdrożenia opracowanego układu. Znane są również prace dotyczące przyspieszonego rozruchu i odstawiania za pomocą kontrolowanego wtrysku pary chłodzącej do głównego przepływu pary w turbinie. Wyniki

uproszczonych analiz dwuwymiarowych potwierdziły możliwość skrócenia czasu rozruchu turbiny przy zachowaniu poziomu naprężenia i odkształcenia w newralgicznych elementach na bezpiecznym poziomie.

Oceniana praca wpisuje się więc w cykl badań nad dopuszczeniem pozaprojektowych zmian obciążenia w turbinach, które zaprojektowane są na klasyczne obciążenia cieplne. Negatywne skutki szybkich procesów ograniczane są za pomocą lokalnej kontroli stanu temperatury i deformacji oraz wtryskiem pary chłodzącej lub nagrzewającej. Podjęte badania są istotne ze względu na obowiązujące ograniczenia emisji CO₂ oraz sytuację geopolityczną w Europie. Wśród wielu opublikowanych prac na temat uelastycznienia pracy bloków konwencjonalnych ze względu na negatywne oddziaływanie OZE jest mało badań przy wykorzystaniu zintegrowanych trójwymiarowych modeli Fluid-Structure Interaction (FSI). Podjęty temat badań należy więc uznać za ambitny i uzasadniony.

B. CHARAKTERYSTYKA PRACY

Recenzowana praca doktorska jest napisana w języku polskim, liczy 169 stron i została podzielona na 7 rozdziałów. Rozpoczyna się od spisu treści, podziękowań oraz streszczeń w języku polskim i angielskim. Praca kończy się listą wykorzystanej literatury, spisem rysunków i tabel oraz załącznikiem.

W rozdziale pierwszym zamieszczono wprowadzenie z opisem głównych celów oraz tej pracy.

W rozdziale drugim przedstawiono narzędzie obliczeniowe Thermal-FSI z rozszerzeniem hipotezy Burzyńskiego na obszar wysokich i bardzo wysokich temperatur.

Rozdział trzeci oraz czwarty poświęcone są weryfikacjom modeli Thermal-FSI. W rozdziale trzecim wykonano przegląd literatury a w czwartym walidację modelu łopatki turbiny parowej, która uległa awarii. W tym celu wykorzystano dostępne zdjęcia uszkodzonej łopatki, dane dotyczące przebiegu awarii oraz dane literaturowe, co pozwoliło na szczegółowe odwzorowanie geometrii oraz warunków pracy turbiny. Przeprowadzone obliczenia numeryczne z zakresu analizy sprzężonego pola cieplno-przepływowo-wytrzymałościowego pozwoliły na identyfikację mechanizmów prowadzących do uszkodzenia. Wyniki symulacji wskazały, że zaproponowany model łopatki jest w stanie odwzorować kluczowe zjawiska fizyczne, które prowadziły do pęknięcia łopatki w rzeczywistości.

W rozdziale piątym opisano szereg koncepcji co do sposobu i miejsca wtrysku pary jako sposobu kontroli stanu cieplnego elementu krytycznego. Pozwoliło to na wytypowanie najlepszej modyfikacji geometrii kadłuba oraz wybór sposobu doprowadzania pary wodnej.

W rozdziale szóstym przedstawiono symulacje różnych poza projektowych zmian obciążenia cieplnego tak aby przyspieszyć rozruch i odstawienie turbiny nawet do pół godziny. Przeanalizowano chłodzenie elementów krytycznych stopnia radialno-promieniowego turbiny parą o różnej temperaturze. Badano również wpływ sposobu chłodzenia na kasację luzów między łopatkami a kadłubem wewnętrznym turbiny.

Podsumowanie wyników badań, a także wnioski końcowe zawiera rozdział siódmy. Główny cel doktoratu, którym było opracowanie metody kontroli stanu cieplno-wytrzymałościowego łopatki promieniowej turbiny wysokoprężnej poprzez wtryskiwanie niewielkiej ilości pary został zrealizowany. Metoda ta okazała się skutecznym sposobem ograniczenia naprężeń termicznych w łopatce podczas gwałtownych zmian obciążenia. Umiarkowane chłodzenie znacząco redukuje maksymalne naprężenia zwłaszcza w okolicy nasady łopatki względem wariantu bez chłodzenia. Dzięki temu maksymalne naprężenia przenoszą się z nasady łopatki na mniej wrażliwe pióra łopatki, a ich wartości są niższe niż pierwotnie. Dodatkowo, chłodzenie zmniejsza skalę kasacji luzów między łopatką

a kadłubem podczas procesów rozruchu lub odstawienia turbiny, co obniża ryzyko ocierania się elementów lub ich blokady.

C. UWAGI DYSKUSYJNE

Pytania do pracy:

- 1) Na stronie 18 Autor pisze: „Dla elementów stalowych i żeliwnych, a więc materiałów, z których wykonane są elementy turbiny parowej, pełzanie uwzględnia się od temperatury 300 st. C.” Czy nie byłoby lepiej użyć znanego w literaturze pojęcia temperatury granicznej?
- 2) Na stronie 27 Autor pisze: „Mimo wdrożenia rozwiązań mających na celu kontrolę temperatury, w analizowanym przypadku nie udało się zapobiec awarii na stopniu promieniowo-osiowym.” O jaki przypadek chodzi? Czy Autor ma na myśli awarię stopnia promieniowo – osiowego, która jest modelowana w rozdziale czwartym?
- 3) Na stronie 32 opis metody wyznaczania obciążeń termicznych w oparciu o całkę Duhamela jest mało precyzyjny. Należy poprawnie zdefiniować naprężenie cieplne oraz funkcję wpływu.
- 4) Gdzie zlokalizowane są punkty, które wybrano na przedstawione przebiegi temperatury na rys. 46?
- 5) Wyniki w rozdziale czwartym budzą wątpliwości. Bazując na rysunku 62 oraz tabeli 7 można zauważyć, że granica plastyczności dla stali St12t (linia przerywana) nie została przekroczona w całym cyklu pracy łopatk. Dlaczego dochodzi więc do powstania odkształceń trwałych po całym cyklu pracy, które pokazano na rysunkach 64 i 65? Być może przyjęto w obliczeniach granicę plastyczności pokazaną krzywą przerywano-kropkową? Ale skąd ona pochodzi?
- 6) Jak dalekie są wyznaczone naprężenia w rozdziale szóstym od dopuszczalnych naprężeń w procesach nagrzewania i ochładzania łopatk?
- 7) Szósty wiosek w rozdziale siódmym należy traktować jako ciekawy kierunek dalszych badań. Jak można byłoby przedstawić harmonogram badań numerycznych w celu opracowania proponowanego szybkiego analitycznego domknięcia on-line?

Uwagi redakcyjne:

- a) Patenty [39,59–62] powinny być podane z ich numerami na przykład patent [39] Gobrecht, E., Rieman, S., and Zimmer, G., 2017, “Method for Cooling down a Steam Turbine.” ma numer: 11346245.
- b) Na stronie 18 powołano się na rysunek 3.2, którego nie ma w pracy.
- c) Na stronie 60 napisano „i chłodzenia powietrzem od 300°C.” Analizując rysunek 47 chyba raczej powinno być napisane: „i chłodzenia powietrzem do 300°C.”
- d) Zauważono brak konsekwencji w zapisie zmiennych oraz terminów. Wektor prędkości w równaniach (2.1) do (2.11) oznaczono jako $\mathbf{v}$ natomiast w równaniach (2.18) do (2.21) jako $\mathbf{U}$. Sformułowanie Thermal-FSI jest zapisywane od wielkiej lub małej litery.
- e) Powołanie przy zapisywaniu równania (2.13) na stronie 45 na pozycje [1, 20] nie jest właściwe.
- f) Co oznacza w równaniu (2.13) operator div_2 ?
- g) Zauważono dużo literówek w pracy na przykład: na stronie 32 „Obciążenia termiczna”, „wyznaczyć można naprężenia termiczna σ^T ”
- h) Powołanie na rys. 78 na stronie 96 nie jest prawidłowe. Nie przedstawia on pola temperatury.
- i) Powołanie na pracę dyplomową [82] na stronach 168 i 169 nie jest prawidłowe. Należy podać literaturę źródłową, z której pochodzą te dane materiałowe.

j) W rozdziale szóstym brakuje oznaczenia na rysunkach kierunku osi Z.

D. OCENA KOŃCOWA

W recenzowanej rozprawie Doktorant podejmuje ambitny temat opracowania metody kontroli stanu cieplno-wytrzymałościowego łopatki promieniowej turbiny wysokoprężnej poprzez wtryskiwanie niewielkiej ilości pary. W tym celu przeprowadził On szerokie badania numeryczne obejmujące budowę modelu do sprzężonej analizy FSI, który łączy termomechanikę ciała stałego z termomechaniką płynów roboczych. Taka analiza pozwala precyzyjnie wskazać newralgiczne obszary oraz ilościowo ocenić efektywność zabiegów takich jak wtrysk pary chłodzącej. Opracowany model numeryczny został przez Niego pozytywnie zweryfikowany dla łopatki turbiny parowej, która uległa awarii. Wyniki opisane w pracy potwierdzają skuteczny sposób ograniczenia naprężeń termicznych w łopacie podczas gwałtownych zmian obciążenia. Umiarkowane chłodzenie znacząco redukuje maksymalne naprężenia zwłaszcza w okolicy nasady łopatki względem wariantu bez chłodzenia. Dzięki temu maksymalne naprężenia przenoszą się z nasady łopatki na mniej wrażliwe pióra łopatki, a ich wartości są niższe niż pierwotnie. Dodatkowo, chłodzenie zmniejsza skalę kasacji luzów między łopatką a kadłubem podczas procesów rozruchu lub odstawienia turbiny.

Pomimo zamieszczonych uwag merytorycznych Doktorantowi udało się wyciągnąć z wykonanych badań wnioski pozwalające na znaczne skrócenie czasu rozruchu lub odstawienia analizowanej turbiny przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa jej pracy. Mgr inż. Mateusz Bryk w ocenianej rozprawie wykazał się szeroką wiedzą, umiejętnością wnioskowania i profesjonalizmem w zakresie analiz przepływowo-cieplno-wytrzymałościowych oraz znajomością nowoczesnych metod i programów obliczeniowych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona praca Pana Mateusza Bryka pt. „Zaawansowana kontrola stanu łopatki promieniowej w trakcie pozaprojektowych zmian obciążenia za pomocą narzędzi Thermal – FSI” spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" z 20 lipca 2018 roku. Powinna więc być dopuszczona przez Radę Naukową Instytutu Maszyn Przepływowych PAN do dalszego postępowania w celu nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.