

prof. dr hab. inż. Jerzy Manerowski
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
ul. Księcia Bolesława 6
01-494 Warszawa
e-mail: jerzy.manerowski@itwl.pl
tel. 606 290 309

Warszawa, 25.01.2023 r.

R e c e n z j a

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława Bondyry
pt. „Przepływowo-dynamiczna modernizacja łopatki wirnikowej turbiny
parowej”

Zamówienie- Instytut Maszyn Przepływowych PAN
/prof. Grzegorz Żywica/

1. Uwagi ogólne

Przedmiotem rozprawy jest opracowanie konstrukcji łopatki ostatniego stopnia turbiny parowej 13K215 wraz z jej modyfikacją łopatek kierowniczych i wylotów. Celem tych prac jest poprawa sprawności i podwyższenie generowanej mocy maszyny. Do realizacji tego zadania wykorzystane zostały własne analizy m.in. wytrzymałościowe, przepływowe i drgań konstrukcji wraz z nowoczesnymi pakietami oprogramowania komputerowego.

Rozprawa przedstawiona jest na 154 stronach w 9 rozdziałach i w pięciu załącznikach. Wykaz literatury obejmuje 87 pozycji istotnie związanych z problematyką rozprawy.

2. Treść rozprawy

We wstępie doktorant przedstawia celowość podjęcia modernizacji turbiny 13K215. Podkreśla ograniczone przez producenta unowocześnienia jej konstrukcji prowadzące do poprawy sprawności przy zachowaniu długotrwałej bezawaryjnej pracy, co przedstawia rozdz. 2 i 3.

W rozdz. 3 przedstawione zostały (w oparciu o badania producenta oraz literaturę) interesujące analizy wpływu długości łopatek wirnikowych części średnioprężnej turbin 200MW na jej sprawność wraz z problematyką wytrzymałości, przepływu i drganiami konstrukcji. Z uzyskanych wyników uwidacznia się przyrost mocy turbiny i sprawności wraz ze zwiększeniem długości łopatki.

Cel i zakres pracy zawiera rozdz. 4. Na podstawie wyników rozważań poprzednich rozdziałów sformułowany został cel rozprawy: „zaprojektowanie wysokosprawnej łopatki wirnikowej ostatniego stopnia części średnioprężnej układu łopatkowego bez drutu tłumiącego”. Dotyczy to aktualnie stosowanej 500mm w turbinie łopatki reakcyjnej. Doktorant podaje dane dotyczące wpływu długości łopatki na poprawę mocy turbiny, prędkość wypływu pary i straty wylotowe. Wzrost długości łopatki korzystnie wpływa na wymienione parametry.

Problematyka projektowania łopatek turbin parowych przedstawiona została w rozdz. 5. Doktorant przedstawia metody obliczeniowe 1D i 2D. Znaczące w tym rozdziale są rozważania dot. wpływu stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych na sprawność maszyny. Wykorzystane zostały tu dane literaturowe oraz doświadczenia autora w projektowaniu turbin.

Rozdziały od 6 do 9 stanowią zasadniczą część rozprawy – zaprojektowanie łopatek turbiny.

Rozdział 6 zawiera autorską metodę projektowania łopatek. Proces obliczeń ostatniego stopnia łopatki części średnioprężnej turbiny przedstawia schemat (rys. 6.10). Wg schematu kolejne etapy obliczeń łopatki (przepływowe, wytrzymałościowe, drgań itd.) realizowane są iteracyjnie. Do zaprojektowania łopatki wykorzystane zostały programy komputerowe CATIA i ANSYS:

- pióra łopatki – obliczenia przepływowe,
- stopka – metoda elementów skończonych,
- bandaże – obliczenia jak wyżej.

W odniesieniu do obliczeń bandaża (p. 3, 11w⁹), jest stwierdzenie, że „...pełni on rolę tłumienia drgań własnych łopatki”. Ograniczenie tłumienia jedynie do drgań własnych łopatki jest niepoprawne, również ze względu na obliczenia zmęczeniowe zawarte w rozdz. 8.

W omawianym rozdziale obszerne są rozważania dotyczące możliwości zastosowania modernizacji łopatek (500mm) w istniejącej turbinie. Wartościowe są tu analizy i komentarze dotyczące różnych wariantów rozwiązań konstrukcyjnych uwzględniające praktykę projektowania turbin.

7 rozdział rozprawy zawiera badania przepływowe, które pozwoliły na opracowanie profili łopatek wirnikowych i kierowniczych. Uwzględnione zostały przy tym przecieki występujące na projektowanych bandażach łopatek wirnikowych oraz kierowniczych. Wykorzystane zostało tu nowoczesne oprogramowanie komercyjne. Na stronie 62 (w13⁹) Autor pisze „w celu ograniczenia zapotrzebowania na moc obliczeniową” w obliczeniach przyjęty został model jednej łopatki kierowniczej i jednej wirnikowej. Dobrze tu byłoby zamieścić informacje o wpływie tego założenia na dokładność obliczeń. Wiele prac IMP PAN zawiera obliczenia w całych kanałach przepływowych maszyn wirnikowych. Wysoko oceniam zamieszczone w rozdziale komentarze i uzasadnienia przyjętych założeń dotyczące kolejnych etapów projektowania łopatek. Rozdział kończy podsumowanie, które zawiera porównanie parametrów przepływowych projektowanej łopatki z łopatką o długości 400mm. Dlaczego nie obecnie występujących w turbinach łopatek 500mm?

8 rozdział zawiera obliczenia wytrzymałościowe statyczne i dynamiczne łopatki wirnikowej (pióra, bandaże i stopki) oraz tarczy tarczy. Wykorzystana została MES. Obliczenia rozpoczęte zostały od stopki łopatki. Rozpatrzone zostały 3 rodzaje stopek (młotkowa, kołkowa i jodełkowa). Po analizie wyników oraz danych literaturowych w projektowanej łopatce przyjęta została stopka jodełkowa prosta oraz łukowa. Wartościowe są tu dyskusje dotyczące możliwości i celowości modernizacji łopatek eksploatowanych aktualnie turbin. Do tego kwestie wykonawcze, montażu jak i kosztów przedsięwzięcia oraz praktyki producenta turbin.

Kolejnym elementem projektowania jest bandaż łopatki, który został przyjęty w zamian za stosowane aktualnie druty tłumiące drgania (prowadzone przez pióra łopatek), które to zwiększają straty przepływu. Ta część rozdziału tj. wiele wariantów trudnych w modelowaniu konstrukcji bandaża z elementami tłumiącymi odkształcenia łopatki jest znaczącą w rozprawie.

Następnie przedstawione są obliczenia wytrzymałościowe łopatki wraz ze stopką oraz bandażem (MES 3D). W obliczeniach pióra korygowana została geometria poszczególnych przekrojów wzdłuż jego długości (korekcja przekrojów z obliczeń przepływowych). Obliczenia wytrzymałościowe - pióra łopatki oraz naprężenia kontaktowe występujące pomiędzy powierzchniami współpracującymi ze sobą

(bandaże, wręby tarcza-stopka) – przeprowadzone zostały przy założeniu obciążeń stacjonarnych.

W tym rozdziale badana jest niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa wirnika. Jako cykl obciążenia przyjęte zostały obciążenia w postaci sił – odśrodkowej, od przepływającej pary i od jej temperatury. Cykl obciążenia rozumiany jest jako obciążenie podczas rozruch i odstawiania turbiny. Tu w związku z tym stwierdzenie na str. 103(1w⁹) „...niestacjonarne siły działające na profil...” jest nieprecyzyjne. Cykle obciążenia przedstawione na str. 118 i 119 powinny być lepiej opisane (jak interpretować nieciągłości na przebiegach czasowych. Rozdział kończy propozycja projektu rozwiązań konstrukcyjnych łopatk w oparciu o wyniki obliczeń rozpatrywanych wielu wariantów konstrukcji wirnika.

Rozdział 9 zawiera podsumowanie i wnioski z uzyskanych wyników.

3. Ocena rozprawy

1. Recenzowana rozprawa w sposób kompleksowy traktuje problematykę projektowania łopatek wirnikowych turbin parowych z wykorzystaniem nowoczesnego oprogramowania komputerowego.
2. Rozprawa jest starannie opracowana pod względem merytorycznym, a tu można wymienić precyzję dot. założeń, konsekwencję ich stosowania kolejnych etapach realizowanych zadań, prowadzoną dyskusję, następnie weryfikację opartą na badaniach numerycznych z odniesieniem do danych eksperymentalnych. To daje możliwość praktycznego wykorzystania wyników doktoratu. W rozprawie występują uchybienia redakcyjne (tzw. literówki i braki opisu rysunków).
3. Pewnym ograniczeniem rozprawy jest uwzględnienie jedynie obciążeń stacjonarnych łopatek. Doktorant planuje uwzględnienie obciążeń niestacjonarnych w kolejnych pracach.
4. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Kandydat legitymuje się wiedzą teoretyczną pozwalającą na samodzielne prowadzenie prac naukowych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna (w zakresie - wirnikowe maszyny przepływowe).

4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Radosława Bondyry pod tytułem „Przepływowo dynamiczna modernizacja łopatek wirnikowej turbiny parowej” spełnia wymagania ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 1117). Wg art. 187 tej ustawy rozprawę kwalifikuję jako pracę konstrukcyjną (projektową) w dziedzinie nauk *inżynieryjno-technicznych* w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

