

Łódź, 4 stycznia 2023 r

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kozanecki
POLITECHNIKA ŁÓDZKA
Instytut Maszyn Przepływowych
93-005 Łódź
ul. Wólczańska 219/223
tel. (42) 631 23 61 fax. (42) 636 13 83
e-mail: zbigniew.kozanecki@p.lodz.pl

Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Radosława Bondyry pt:

**„Przepływowo-dynamiczna modernizacja łopatk wirnikowej
turbiny parowej”**

opracowana na zlecenie Dyrektora ds. Naukowych IMP PAN w Gdańsku
na podstawie uchwały Rady Naukowej z dnia 18.11 2022 r.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska poświęcona jest problematyce projektowania łopatek turbin parowych i zawiera propozycję nowego rozwiązania łopatki o długości pióra 500 mm dla ostatniego stopnia części średnioprężnej (SP) turbin 13K215. Zamiarem Autora jest, aby zaprojektowana łopatka wieńca wirującego mogła również być zastosowana w modernizacji pozostałych turbin rodziny 200MW takich jak 13K200 i 13K210.

Autor pracy, z racji swojego zatrudnienia w firmie GE Power Sp. z o.o. w Warszawie, Oddział w Elblągu, zna aktualne podejście i doświadczenia koncernu GE, w którym od wielu lat standardowym rozwiązaniem dla łopatki ostatniego stopnia części SP turbin klasy 200 MW była łopatka o maksymalnej długości profilu 322 mm. Temat modernizacji ostatniego stopnia części SP był odsunięty na dalszy plan, ponieważ największe uzyski energetyczne związane ze wzrostem mocy i sprawności tego typoszeregu turbin parowych osiągnano poprzez modernizację układu przepływowego części NP.

Aktualne wymagania ekologiczne zmuszają producentów energii elektrycznej do szukania rozwiązań, które przynoszą wymierne zyski związane z podwyższeniem mocy generowanej przez turbinę przy możliwie wysokiej sprawności. Takie podejście zmniejsza jednostkowe zużycie ciepła w klasycznych systemach produkcji energii elektrycznej i jest bardzo istotne z punktu widzenia ekologii, bowiem może znacząco obniżyć jednostkowe emisje szkodliwych produktów spalania do atmosfery.

Taką przesłanką kierował się Autor rozprawy dokonując analizy możliwości zaimplementowania łopatek wirnikowych dłuższych niż 400 mm w ostatnim stopniu części SP dla całej, ciągle jeszcze licznej, grupy turbin energetycznych 200 MW eksploatowanych w Polsce.

Tematyka rozprawy pozwala zakwalifikować ją do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych i dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Jej podstawowym celem jest wykazanie na bazie obliczeń numerycznych możliwości realistycznej modernizacji turbiny parowej rodziny 200 MW oraz przedstawienie wielowątkowego algorytmu projektowania wysokosprawnej łopatki wirnikowej ostatniego stopnia części SP bez drutu tłumiącego.

Dlatego uważam, że wybór tematu oraz sformułowany cel rozprawy jest oryginalny pod względem poznawczym i odpowiada poziomowi pracy doktorskiej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Ogólne omówienie rozprawy

Praca liczy ponad 154 strony wraz z załącznikami i obszernymi streszczeniami w języku polskim i angielskim. Jej zasadnicza część jest podzielona na 9 rozdziałów.

W części wstępnej Autor uzasadnia potrzebę rozwoju i modernizacji konwencjonalnych jednostek do produkcji energii z wykorzystaniem spalania paliw kopalnych. Stoi to wprawdzie w pewnej sprzeczności z wymaganiami współczesnej ekologii, ale niestety zeroemisyjne technologie nie są jeszcze na tym etapie rozwoju, aby zaspokoić rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną, również ze względu na brak możliwości jej magazynowania. Z tego powodu istniejące jednostki konwencjonalne będą jeszcze w najbliższej przyszłości eksploatowane, ale ważnym tego aspektem będzie poprawa ich sprawności, a więc niższe zużycie paliw kopalnych i zmniejszenie emisji dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych.

Na tym tle Autor eksponuje kierunek swojej pracy związany z modernizacją łopatki ostatniego stopnia turbiny parowej 13K215 w celu podniesienia sprawności i mocy całej turbiny.

W rozdziale 2 przedstawiono historycznie modernizacje energetycznych turbin parowych rodziny 200 MW produkowanych w Polsce.

Autor wskazał ostatnio zmodernizowaną konstrukcję turbiny 13K215 jako wybrany obiekt, dla którego szczegółowo rozważa w swojej pracy modernizację łopatki wirnikowej ostatniego stopnia korpusu SP.

W rozdziale 3 znajduje się obszerny opis problematyki związanej z projektowaniem łopatek turbin parowych. Omówiono tu parametry i czynniki, które warunkują prawidłową ich pracę oraz zagrożenia związane z ich funkcjonowaniem. Następnie na bazie literatury Autor przeanalizował siły działające na łopatkę, warunki w jakich pracuje, a także wymagania związane z wyborem zastosowanych materiałów. Ostatnia część tego rozdziału charakteryzuje aktualne doświadczenia koncernu GE związane z podejmowanymi wcześniej próbami modernizacji ostatniego stopnia części SP turbin klasy 200 MW. Autor przedstawił tu przegląd prac koncernu GE prowadzonych po 2010 r., które polegały na zmianie (zwiększeniu) reakcyjności stopnia oraz zmianie sposobu zwijania łopatki i zwiększenie długości pióra w celu podniesienia sprawności i mocy części SP turbiny. W konsekwencji tych prac powstały w koncernie projekty uwzględniające możliwości wydłużenia łopatki wirnikowej ostatniego stopnia części SP z bazowych 322 mm do wartości 358 mm oraz 400 mm.

Projekty modernizacji części SP turbiny sprowadzały się więc do zastąpienia oryginalnej akcyjnej łopatki ostatniego stopnia o długości 500 mm z dwoma drutami tłumiącymi łopatką reakcyjną o długości 400 mm z bandażem.

Z uwagi na największy uzysk energetyczny standardowo prowadzone modernizacje turbin parowych 200 MW polegają głównie na zmianach konstrukcyjnych części NP turbiny polegających wyeliminowaniu typowego dla tych turbin stopnia piętrowego Baumana i zastąpienie go klasycznym układem łopatek wolnostojących.

Podjęta przez koncern decyzja o zakresie modernizacji ostatniego stopnia układu łopatkowego części SP, którego długość łopatki reakcyjnej wynosiła 400 mm zainspirowała Autora do sformułowania w rozdziale 4 następującego celu i zakresu jego pracy:

Celem pracy doktorskiej jest analiza możliwości zaimplementowania łopatek dłuższych niż 400mm oraz zaprojektowania wysokosprawnej łopatki wirnikowej ostatniego stopnia części SP bez drutu tłumiącego

W rozdziale 5 przedstawiono podstawy teoretyczne metod obliczeniowych stopni turbin osiowych z krótkimi łopatkami (tzw. łopatkami cylindrycznymi) oraz z długimi łopatkami (tzw. łopatkami zwijanymi) oraz przedstawiono klasyfikację strat stopnia turbiny parowej i metodykę szacowania/obliczania sprawności stopnia.

Rozdział 6 zawiera opis metody projektowania i określenia maksymalnej długości łopatki ostatniego stopnia części SP w turbinach 13K215, z punktu widzenia przepływowego, wytrzymałościowego i dynamicznego (tłumienie drgań). Do projektowania pióra łopatki wykorzystano oprogramowanie CATIA V5 oraz BladeGen wbudowany w zasoby oprogramowania ANSYS CFX.

W rozdziale 7 opisano kolejne kroki numerycznej analizy przepływowej (ANSYS CFX) obejmujące opracowanie modelu łopatki wirnikowej i łopatek kierowniczych oraz przyjęcie do obliczeń założonych warunków brzegowych oraz parametrów termodynamicznych. Dane te zaczerpnięte zostały z poprzednich modernizacji turbin 13K215 oraz z wewnętrznego oprogramowania GE Power ALPRO HT160 zrealizowanego projektu dla turbin klasy 200MW.

Autor zaprezentował także interesujący schemat algorytmu modernizacyjnego z wykorzystaniem w/wym. oprogramowania, który pozwala na numeryczne analizy wpływu zmiany geometrii łopatki na uzyskane wyniki obliczeń końcowych stanowiących kompromis związany z optymalnym kształtem pióra łopatki z punktu widzenia obliczeń przepływowych, obliczeń wytrzymałościowych oraz wymagań charakterystyk dynamicznych projektowanego wieńca łopatkowego. W końcowej części rozdziału podsumowane zostały wyniki wykonanych obliczeń numerycznych.

Szczegółowe obliczenia wytrzymałościowe projektowanej łopatki wirnikowej stanowią treść rozdziału 8 pracy. Zostały one wykonane w programie ANSYS a modele 3D do obliczeń opracowano wykorzystując oprogramowanie CATIA V5 dla przyjętych danych materiałowych, warunków brzegowych, oraz parametrów siatki bazujących na standardach firmy GE. Rozdział kończą analizy obliczeń wytrzymałościowych dla łopatki ze standardowym bandażem oraz dla wybranych wariantów bandaża a także analiza modalna i zmęczeniowa niezbędne do sprawdzenia poprawności konstrukcji łopatki/wieńca łopatkowego. Podsumowaniem jest dyskusja finalnych rozwiązań wraz z uzasadnieniem ich wyboru.

Rozdział 9 zamyka pracę stanowiąc syntetyczne podsumowanie zakresu badań i analiz przeprowadzonych przez Autora w zakresie pracy. We wnioskach i uwagach Autor przedstawił zasadnicze wyniki przeprowadzonych badań i analiz, które potwierdzają osiągnięcie celu pracy sformułowanego w rozdziale 4.

Wskazuje to na realną możliwość zastosowania w modernizowanych elementach turbiny 13K215 zaprojektowanych w ramach pracy wysokosprawnych łopatek ostatniego stopnia dłuższych niż 400 mm w części średnioprężnej turbiny 13K215, spełniających wymagania przepływowe i wytrzymałościowe, potwierdzoną szczegółowymi obliczeniami numerycznymi.

Nowe elementy analiz zawartych w rozprawie, które zdaniem Autora, mają stanowić Jego osiągnięcia naukowe i użyteczne zostały przedstawione syntetycznie w 7 punktach. Pracę kończy propozycja ukierunkowania niezbędnych dalszych badań, związanych przede wszystkim z bezwzględnie konieczną wytrzymałościową weryfikacją eksperymentalną zaproponowanego rozwiązania na rzeczywistym obiekcie (test *overspeed*), a także uzupełnienie analizy przepływowej o niestacjonarne obliczenia przepływowe CFX oraz analizę drgań ułopatkowanej tarczy. Świadczy to o właściwym, realistycznym stosunku Autora do wyników zrealizowanej pracy.

Ocena rozprawy

Rozwijane przez Doktoranta zagadnienie jest aktualne i istotne ze względów poznawczych i aplikacyjnych w praktyce inżynierskiej ale również, a może przede wszystkim w odniesieniu do obecnego kryzysu energetycznego i wyzwań ekologicznych i politycznych jakie stoją przed producentami energii elektrycznej z wykorzystaniem klasycznych, kopalnych nośników energii. Doskonalenie efektywności tych sposobów produkcji energii jest w zasadzie jedynym możliwym podejściem, pozwalającym znacząco obniżyć jednostkowe emisje szkodliwych produktów spalania do atmosfery, które są nieuniknione przy wytwarzaniu energii z takich źródeł.

Praca charakteryzuje się przejrzystym układem a jej podział wprowadza, w sposób logiczny, w szereg problemów technicznych niezbędnych dla wyjaśnienia złożoności poruszanych zagadnień i udokumentowania sformułowanych wniosków. Wybór bardzo obszernej literatury tematu jest trafny merytorycznie.

Za podstawowe osiągnięcia pracy uważam:

1. Opracowanie szeregu procedur, które umożliwiły osiągnięcie celu finalnego pracy, jakim był zrealizowany projekt wysokosprawnej długiej łopatki wirnikowej turbiny parowej dla ostatniego stopnia części SP turbiny 13K215, charakteryzującej się wymaganą żywotnością i spełniającą założone kryteria charakterystyki dynamicznej. Przykładem takiej procedury może być np. zaproponowany przez Autora algorytm modernizacyjny z wykorzystaniem nowoczesnego oprogramowania, który pozwala na numeryczne analizy wpływu zmiany geometrii łopatki na uzyskane wyniki obliczeń końcowych stanowiących zawsze kompromis pomiędzy optymalnym kształtem aerodynamicznym pióra łopatki a wynikiem obliczeń wytrzymałościowych oraz wymaganiami charakterystyk dynamicznych projektowanego wieńca łopatek.

2. Zaprojektowanie innowacyjnego rozwiązania bandaża łopatkowego, który utrzymuje integralność wieńca wirnikowego i zapobiega nadmiernym odkształceniom łopatki/wieńca łopatek w trakcie funkcjonowania.
3. Wykazanie, na podstawie obliczeń numerycznych, że dla opracowanej w przez Autora łopatki o długości 500 mm dla ostatniego stopnia korpusu SP turbiny 200 MW nie będzie wymagane stosowanej rozwiązania tłumiącego drgania (2 rzędy drutów tłumiących), co znacząco zwiększa sprawność takiego stopnia.
4. Przygotowanie rozwiązania dla niezmodyfikowanych turbin 13K215, dla których zaprojektowano łopatkę wirnikową wyposażoną w stopkę palczastą kołkowaną, co prowadzi to do wzbogacenia asortymentu modernizacji oferowanych przez firmą GE Power – macierzystą instytucję Autora pracy.

Lektura całości pracy skłania do sformułowania **kilku uwag krytycznych** i wymaga pewnych wyjaśnień.

W rozdziale 5 Autor podjął próbę wyjaśnienia zasad kształtowania długich łopatek stopni osiowych (tzw. łopatek zwijanych). Zasady zwijania (kształtowania) długich łopatek stopni osiowych turbin cieplnych mają bardzo długą tradycję, bowiem zaczęto je stosować w budowie turbin już w latach 30-tych (Darie, 1929), gdzie rozwiązano problem zwijania łopatek wg. wspomnianej przez Autora zasady wiru swobodnego $c_u r = \text{const}$ dla turbin cieplnych. Stopnie zaprojektowane w oparciu o tę zasadę są bardzo dobrze przebadane i nadal szeroko stosowane w praktyce konstruowania turbin. Tak zaprojektowane stopnie zapewniają spełnienie warunku stałości energii przekazywanej wzdłuż wysokości łopatki, a znamieną dla nich jest znaczna zmiana udziału dynamicznego wirnika (reakcyjności) wzdłuż wysokości łopatki. Wywołuje to znaczne wartości liczb Macha u podstawy łopatki za wieńcem kierującym i przy obrzeżu zewnętrznym za wieńcem wirnika, co ma niekorzystny wpływ na straty. W wielu przypadkach wybór odpowiedniej metody zwijania łopatek pozwala na znaczne zmniejszenie strat energii w strefach przy piąście i u wierzchołka łopatki, a także na znacznie bardziej równomierny rozkład liczb Macha wzdłuż wysokości łopatki. Przykładem może tu być ukształtowanie łopatki według zasady $c_u r^n = \text{const}$, która pozwala na zaprojektowanie stopni o względnie małych wartościach D/l . Niezbyt jasno wyjaśniono te problemy w pracy, co implikuje, następujące pytania:

1. Jaką zasadę kształtowania łopatki finalnie przyjął Autor pracy w swoim projekcie ?
2. Jak definiuje Autor wartość udziału dynamicznego (reakcyjności) całego rozważanego stopnia/łopatki?

Pytanie 2 wiąże się ze stwierdzeniem ze str. 46 – („...opracowano łopatkę o długości 500 mm ze skrzyconym profilem o reakcyjności około 0.46...”), bowiem dla zwijanych łopatek reakcyjność stopnia zmienia się wzdłuż promienia (akcyjny u stopy i silnie reakcyjny u wierzchołka), co implikuje korzystny rozkład ciśnienia dla zachowania osiowo symetrycznego przepływu w szczelinie międzywieńcowej.

Rozumiem, że twierdzenie Autora ze str. 37 – („...w przypadku turbin osiowych składowa promieniowa jest niepożądana, ponieważ nie wpływa w żaden sposób na sprawność turbiny. „) należy zaliczyć do pomyłek redakcyjnych, bowiem obecność składowej promieniowej w przepływie przez stopień jest dowodem na utratę równowagi promieniowej przepływu i źródłem dodatkowych strat. Wiąże się z tym kolejna wątpliwość wymagająca wyjaśnienia:

3. Czy tylko obszar w którym występują wektory prędkości o kierunku „odwrotnym” do projektowego przepływu pary (patrz stwierdzenie ze str. 46) jest jedynym wyznacznikiem niepożądanych przepływów wtórnych i dodatkowych strat przepływowych czy też wystarczający warunkiem wzrostu strat jest istnienie składowych wektora prędkości niezgodnego z tym kierunkiem?

Ocena merytoryczna pracy i wnioski:

Przedstawiona do recenzji praca doktorska dotyczy istotnego problemu badawczego związanego z doskonaleniem konstrukcji osiowych turbin parowych. Pomimo problemów związanych z modernizacjami maszyn i zawsze występującymi ograniczeniami konstrukcyjnymi/wymiarowymi narzuconymi przez istniejące i konieczne do zachowania komponenty maszyny (korpusy, położenia wylotów itp.) praktycznie wykluczającymi daleko idące zmiany, Autor uzyskał wyniki, które mają dużą wartość poznawczą i użyteczną. Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczam:

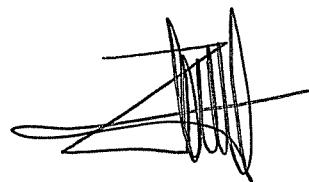
- Jednoznaczne wykazanie na podstawie przeprowadzonych analiz, że istnieje możliwość wykonania wysokosprawnych wieńców łopatek dłuższych niż dotychczas stosowane w podejmowanych przez firmę GE modernizacjach ostatniego stopnia części SP turbin 13K215.
- Zaprojektowanie innowacyjnego rozwiązania bandaża łopatkowego, który utrzymuje integralność wieńca wirnikowego i zapobiega nadmiernym odkształceniom łopatki/wieńca łopatek w trakcie funkcjonowania

Rozprawa charakteryzuje się przejrzystym układem, a jej podział wprowadza w sposób logiczny w szereg problemów technicznych niezbędnych dla wyjaśnienia złożoności poruszanych zagadnień i udokumentowania sformułowanych wniosków.

Dobrym pomysłem, ułatwiającym jej czytelność, było przesunięcie do załączników szeregu rysunków i szczegółowych wyników dotyczących przeprowadzonych symulacji.

Autor bardzo dobrze opanował zagadnienia związane z modelowaniem złożonej geometrii łopatek wirujących struktur maszyn przepływowych z wykorzystaniem nowoczesnych kodów obliczeniowych. Jest dobrym konstruktorem i wykazał się umiejętnością krytycznej interpretacji osiągniętych wyników, a zamieszczone w recenzji uwagi krytyczne nie podważają w żadnym stopniu znaczących osiągnięć pracy.

Pod względem merytorycznym oceniam przedłożoną do recenzji pracę pozytywnie i stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Radosława Badyra spełnia wymagania obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym oraz stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the left.