

dr hab. inż. Sławomir Błasiak, prof. Uczelni
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Technologii Mechanicznej
Politechnika Świętokrzyska

Kielce, dnia 15.01.2025 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Jacka Bieńkowskiego

nt. Zwiększenie produktywności turbozespołu wodnego z turbiną Francisa poprzez eliminację lub minimalizację zjawiska kawitacyjnego wiru sznurowego

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz, prof. Uczelni.

Promotorem pomocniczym jest dr inż. Przemysław Szulc.

1. Podstawa wykonania recenzji

Recenzja została opracowana w związku z § 1 ust. 11, oraz § 7 ust. 1 *Regulaminu nadawania stopni naukowych na Politechnice Wrocławskiej* (Uchwała nr 22/2/2024-2028 Senatu PWr z dnia 24 października 2024 r.) oraz na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka nr 55/03RDND08/2024-2028 z dnia 13.11.2024 r.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji dysertacja Pana mgra inż. Jacka Bieńkowskiego została zrealizowana w ramach Programu „Doktorat wdrożeniowy”. Praca koncentruje się na redukcji zjawiska powstawania i propagacji kawitacyjnych wirów sznurowych w turbinie Francisa pracującej w warunkach niepełnego obciążenia. Badania opisane w rozprawie zostały poprzedzone szczegółowym przeglądem literatury związanej z tematem pracy. Autor dokonał kompleksowej analizy istniejących metod redukcji kawitacyjnych wirów sznurowych, szczegółowo opisując każdą z nich i wskazując potencjalne możliwości ich zastosowania w elektrowni wodnej Pilchowice I. Ostatecznie, Doktorant zaproponował rozwiązanie techniczne polegające na zastosowaniu struktur geometrycznych w postaci żeber stabilizujących o odpowiednio dobranych wymiarach, zamontowanych w rurze ssącej turbiny. Na podstawie opracowanego planu badań przeprowadził liczne analizy, wykorzystując zaawansowane techniki numeryczne, w tym obliczeniową mechanikę płynów (CFD), oraz zrealizował badania eksperymentalne turbozespołu TZ-2 w rzeczywistych warunkach pracy

w elektrowni wodnej Pilchowice I. Przy użyciu opracowanego modelu numerycznego wykonał symulacje mające na celu ocenę wpływu parametrów geometrycznych żeber, takich jak ich liczba, wysokość i długość, na tłumienie kawitacyjnych wirów sznurowych oraz na efektywność wytwarzania energii elektrycznej. Istotnym elementem pracy było także zastosowanie metod analizy statystycznej i ekonometrycznej w celu opracowania zależności łączących parametry geometryczne żeber z kluczowymi cechami operacyjnymi turbiny, takimi jak generowana moc oraz proces formowania, precesji i zanikania kawitacyjnych wirów sznurowych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa liczy 207 stron i składa się z 14 głównych rozdziałów, spisu treści, spisu ważniejszych oznaczeń, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spisu literatury obejmującego 95 pozycji. Bibliografia obejmuje odwołania zarówno do prac naukowo-badawczych, jak również książek czy stron internetowych związanych z tematyką pracy. W spisie literatury niestety nie widnieje żadne opracowanie naukowe autorstwa Doktoranta.

Zdaniem recenzenta tematyka rozprawy jest aktualna i może mieć istotne znaczenie dla polskiego przemysłu energetycznego, szczególnie w kontekście optymalizacji wydajności elektrowni wodnych. Zastosowanie nowych rozwiązań technicznych, takich jak poprawiona geometria rur ssących, przyczynia się do zmniejszenia strat energii i ograniczenia zjawisk kawitacyjnych, co zwiększa trwałość urządzeń. Istotny wkład Doktoranta w dyscyplinę naukową Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka polega na wprowadzeniu praktycznych rozwiązań opartych na badaniach numerycznych i eksperymentalnych dotyczących kluczowych elementów układów turbin wodnych, przeprowadzone analizy mogą stanowić podstawę do dalszych badań nad efektywnością i niezawodnością systemów przepływowych w energetyce wodnej.

Rozdział 1

Stanowi wstęp do przedmiotowej dysertacji, w którym Autor opisuje znaczenie energetyki wodnej, jako kluczowego elementu odnawialnych źródeł energii, podkreślając jej rolę w redukcji emisji CO₂ i stabilności energetycznej. Przybliży historyczny rozwój elektrowni wodnych w Polsce, zwracając uwagę na znaczenie takich obiektów jak elektrownie w Pilchowicach czy Leśnej. W rozdziale omówiono podstawowe typy turbin wodnych, w tym Peltona, Francisa i Kaplana, oraz ich zastosowanie w zależności od spadku i przepływu. Szczególną uwagę poświęcono funkcji rur ssących, które umożliwiają odzysk energii kinetycznej i stabilizację przepływu. Przedstawiono wyzwania współczesnej energetyki wodnej związane ze spadkiem przepływów hydrologicznych i koniecznością pracy turbin w warunkach pozaoptymalnych. Opisano problem kawitacyjnych wirów sznurowych, które pojawiają się przy niepełnym obciążeniu turbin Francisa, negatywnie wpływając na efektywność i trwałość urządzeń. Zwrócono uwagę na konieczność ograniczania zjawisk kawitacyjnych w celu poprawy efektywności pracy turbin. Omówiono istotę badań związanych z optymalizacją konstrukcji rur ssących, które mają zredukować intensywność zawirowań. Podkreślono wpływ zmieniających się warunków hydrologicznych na pracę elektrowni wodnych oraz na potrzebę dostosowania ich technologii do nowych wyzwań.

Rozdział 2

Przegląd literatury stanowi obszerną część pracy, zajmującą 22 strony (ok. 10% całości). W rozdziale tym Doktorant przedstawił szczegółową analizę kluczowych aspektów związanych z pracą rur ssących w turbinach wodnych oraz wpływem ich geometrii na procesy przepływowe. W pierwszej części rozdziału omówiono znaczenie rur ssących w pracy turbin reakcyjnych, podkreślając ich zdolność do odzyskiwania energii kinetycznej płynu opuszczającego wirnik.

W dalszej części rozdziału opisano różne konstrukcje współczesnych rur ssących, uwzględniając ich specyfikę i zastosowanie w zależności od typu turbiny oraz warunków pracy. Kolejna część rozdziału została poświęcona stratom energii występującym w rurach ssących, w tym wpływowi przepływu z krętem na efektywność ich działania. Omówiono różnice między teoretycznymi a rzeczywistymi modelami przepływu, zwracając uwagę na zmienność prędkości osiowych i obwodowych oraz ich oddziaływanie na sprawność rur ssących. Przytoczono wyniki badań wskazujące, że optymalny kąt zawirowania strumienia czynnika roboczego może znacząco zmniejszyć straty energetyczne, jednocześnie ograniczając ryzyko oderwania się strugi od ścian rury.

Ostatnim poruszonym zagadnieniem była kawitacja w rurach ssących, jej mechanizmy powstawania oraz negatywny wpływ na pracę turbin. Zwrócono uwagę na takie czynniki jak wysokość ssania oraz wpływ geometrii rur na intensywność występowania zjawisk kawitacyjnych. Podkreślono także konieczność dalszych badań nad metodami ograniczania tych zjawisk, co może być kluczowe dla poprawy efektywności turbin wodnych.

Rozdział 3

W tej części pracy, jej Autor na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury przeprowadził analizę metod umożliwiających ograniczenie zjawiska kawitacyjnych wirów sznurowych w turbinach wodnych. W rozdziale tym zidentyfikował aktywne i pasywne metody redukcji tych zjawisk, jako dwa główne podejścia stosowane w praktyce. Aktywne metody, takie jak wtłaczanie powietrza i wtrysk wody, opierają się na bezpośrednim oddziaływaniu na przepływ w rurze ssącej w celu zmniejszenia intensywności zjawiska kawitacji oraz poprawy stabilności pracy turbozespołu. Wtłaczanie powietrza jest jedną z najczęściej stosowanych metod aktywnych, która skutecznie ogranicza drgania i kawitację poprzez wprowadzanie pęcherzyków powietrza do rury ssącej. Wtrysk wody, mimo że jest mniej powszechny, również wykazuje znaczący wpływ na redukcję wirów poprzez zmianę dynamiki przepływu wody. W zakresie metod pasywnych Autor opisuje zastosowanie modyfikacji konstrukcyjnych, takich jak metoda J-Groove, instalacja deflektorów w rurze ssącej, modyfikacja piasty wirnika oraz wykorzystanie regulowanych kryz i żeber stabilizujących. Szczególną uwagę poświęcono geometrii i rozmieszczeniu żeber stabilizujących, które mogą znacząco wpływać na ograniczenie zjawisk zawirowań i poprawę efektywności produkcji energii. Podkreślono także, że każda z metod ma swoje zalety i ograniczenia, a ich skuteczność zależy od specyficznych warunków pracy turbiny. Rozdział zawiera również krytyczną ocenę literatury dotyczącą efektywności poszczególnych metod oraz wskazuje na potrzebę dalszych badań eksperymentalnych i numerycznych w celu optymalizacji zastosowanych rozwiązań.

Rozdział 4

W tej części dysertacji zdefiniowano główne cele, tezę oraz zakres badań niezbędnych do realizacji założeń pracy. Przyjęto, że zastosowanie metod numerycznych (CFD) oraz badań eksperymentalnych, a także analiza uzyskanych wyników, pozwolą na zrozumienie zjawisk przepływowych i opracowanie skutecznego rozwiązania konstrukcyjnego. Proponowane rozwiązanie, opierające się na zastosowaniu żeber stabilizujących w rurze ssącej, ma na celu zwiększenie stabilności pracy turbiny oraz redukcję strat energetycznych.

Rozdział 5

Autor, w tym rozdziale pracy doktorskiej, koncentruje się na opisie przedmiotu badań oraz analizie problematyki związanej z zastosowaniem turbin wodnych typu Francisa w Elektrowni Wodnej Pilchowice I. W rozdziale przedstawiono szczegółowy opis samej elektrowni, jej lokalizację geograficzną, historię oraz charakterystykę techniczną, jak również specyfikację turbozespołów. Uwzględniono aspekty eksploatacji i zarządzania wodą na stopniu Pilchowice, w tym kwestie związane z regulacją przepływów oraz wykorzystaniem rezerwy powodziowej. W kolejnej części rozdziału zdefiniowano problem badawczy związany z występowaniem kawitacyjnych wirów sznurowych w rurze ssącej turbiny Francisa, szczególnie podczas pracy przy niepełnym obciążeniu. Opisano skutki występowania tego zjawiska, takie jak zwiększone drgania i obniżenie sprawności energetycznej, oraz podkreślono ich negatywny wpływ na trwałość elementów turbozespołów. Wskazano również na wyzwania związane z adaptacją istniejących rozwiązań technicznych w celu eliminacji lub ograniczenia tych niekorzystnych zjawisk.

Rozdział 6

Dotyczy szczegółowej analizy obliczeń numerycznych, mających na celu badanie i redukcję kawitacyjnych wirów sznurowych w turbinach Francisa. W rozdziale tym opisano proces modelowania numerycznego z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Fluent CFD, umożliwiającego symulację przepływów wody przez turbinę wodną. Przedstawiono budowę modelu 3D układu przepływowego, proces dyskretyzacji siatek obliczeniowych oraz szczegółowe warunki brzegowe przyjęte w symulacjach. Istotnym elementem była walidacja modelu numerycznego, dokonana poprzez porównanie wyników symulacji z danymi rzeczywistymi, w tym pomiarami przeprowadzonymi na stanowisku pomiarowym w elektrowni wodnej Pilchowice I. Analizy numeryczne uwzględniły różne konfiguracje geometryczne żeber, gdzie badano ich wpływ na stabilność przepływu i redukcję zjawisk związanych z kawitacyjnymi wirami sznurowymi. Uzyskane wyniki badań wskazywały na możliwość efektywnego ograniczenia wirów poprzez optymalizację parametrów geometrycznych żeber, takich jak liczba, wysokość czy długość. Rozdział kończy się krótkim podsumowaniem wyników symulacji, które mają stanowić podstawę dla dalszych badań nad poprawą konstrukcji rur ssących w celu zwiększenia efektywności pracy turbin wodnych oraz minimalizacji strat energetycznych.

Rozdział 7 rozprawy doktorskiej koncentruje się na jakościowej analizie pracy turbiny wodnej Francisca w różnych warunkach operacyjnych. W tej części pracy szczegółowo przeanalizowano dwa punkty pracy: optymalny – P1 oraz pozaoptymalny punkt pracy P2. W obu przypadkach badania koncentrowały się na analizie dynamiki przepływu w rurze ssącej turbiny Francisca oraz wpływu warunków pracy na stabilność układu hydraulicznego. Analizę wyników przeprowadzono dla różnych modeli turbulencji, a Autor wskazuje, że przepływ wody z krętem w rurze ssącej najlepiej oddają model $k-\omega$ oraz Reynolds Stress Model. W punkcie P1 przepływ był stabilny i równomierny, co zapewniało wysoką sprawność turbiny, podczas gdy w punkcie P2 praca przy częściowym obciążeniu prowadziła do intensyfikacji zawirowań, powstawania pierścienia kawitacyjnego oraz wzrostu drgań. Wyniki analizy jakościowej, przedstawione w tym rozdziale, stanowią podstawę do dalszych badań i propozycji rozwiązań konstrukcyjnych, które mogą zwiększyć niezawodność i efektywność pracy turbin wodnych w różnych warunkach eksploatacyjnych.

W **Rozdziale 8** pracy, Doktorant przedstawił badania wstępne nad metodami ograniczania kawitacyjnych wirów sznurowych ze szczególnym uwzględnieniem pasywnych metod redukcji tych zjawisk, wybierając do badań symulacyjnych: deflektory przepływu, dyfuzory, cylindry obrotowe i żebra stabilizujące. Te ostatnie zostały uznane przez Autora, jako najbardziej obiecujące rozwiązanie, co było związane z ich skutecznością w ograniczaniu zjawisk kawitacyjnych przy minimalnym wpływie na sprawność turbiny. Wskazano również, że odpowiednia optymalizacja liczby, wysokości i długości żeber może znacząco zmniejszyć intensywność wirów kawitacyjnych i poprawić stabilność przepływu. Wyniki badań wstępnych wyznaczyły kierunek dotyczący zmian konstrukcyjnych w rurach ssących, które mogą być zastosowane w Elektrowni Wodnej Pilchowice I.

Rozdział 9

Została tu przedstawiona analiza wymiarowa mocy na wale turbiny wodnej typu Francis, uwzględniająca wpływ parametrów geometrycznych żeber stabilizujących na osiąganą moc. Dokonano szczegółowej analizy zależności między parametrami geometrycznymi żeber (liczba, wysokość, długość), a mocą generowaną przez turbinę oraz jej efektywnością w warunkach pozaoptymalnych. W rozdziale przedstawiono metodologię analizy wymiarowej, uwzględniającą założenia dotyczące stałej geometrii wirnika oraz równomiernego rozmieszczenia żeber w rurze ssącej. Doktorant skupił się na obliczeniu mocy na wale turbiny (P_w), traktując ją jako funkcję określonych parametrów hydraulicznych i geometrycznych. Wykorzystano twierdzenie Buckinghama do wyznaczenia bezwymiarowych wielkości, które pozwoliły na określenie zależności między zmiennymi, takimi jak gęstość, prędkość obrotowa, liczba żeber, oraz wysokość i długość żeber na (jak to określił Doktorant) „funkcjonowanie turbiny”.

Rozdział 10

Doktorant zastosował metodę planowania eksperymentu w celu określenia zależności między parametrami geometrycznymi żeber stabilizujących a mocą turbiny. W tym rozdziale zaprezentowano zakres zmian badanych parametrów, takich jak liczba, wysokość i długość żeber, oraz ich wpływ na pracę turbiny.

Zastosowano metodę planowania wielopoziomowego, przy czym eksperyment zaplanowano, jako trypoziomowy. Wartości graniczne parametrów, takich jak liczba żeber (od 4 do 8), wysokość (0,1–0,3 m) oraz długość (1–2 m), zostały oszacowane na podstawie możliwości

technologicznych zabudowy żeber w rurze ssącej. Dla każdego z parametrów obliczono zestaw eksperymentów, który stanowił podstawę do dalszych symulacji numerycznych.

W rozdziale zaprezentowano także macierz planu eksperymentu, która uwzględniała 15 prób, w tym modele z różną liczbą żeber i ich wysokościami oraz długościami. Na podstawie tej macierzy opracowano modele geometryczne, które posłużyły jako punkt wyjścia do symulacji numerycznych. Plan eksperymentu obejmował również założenie, że wyniki eksperymentu będą bazować na wielomianach, umożliwiającym wyznaczenie wpływu poszczególnych parametrów na efektywność działania turbiny.

Rozdział 11

W rozdziale przedstawiono szczegółową analizę jakościową wyników symulacji. Rozpoczęto od wyznaczenia rozkładu ciśnienia w rurze ssącej, co stanowiło podstawowy parametr do oceny poprawności pracy turbiny. Symulacje wykazały, że konfiguracja żeber wpływa na rozkład ciśnienia i ich zdolność do eliminowania zjawisk kawitacji. W rozkładzie ciśnienia statycznego, modele takie jak RS0, RS6, RS9 oraz RS10 charakteryzowały się większymi gradientami ciśnienia, co skutkowało nieregularnym przepływem w rurze ssącej, podczas gdy inne modele wykazały bardziej stabilny przepływ. Modele RS7 i RS9 okazały się najbardziej efektywne pod względem osiąganego mocy oraz sprawności turbiny. Dokonano także analizy porównawczej między parametrami turbiny w pracy optymalnej i pozaoptymalnej.

Rozdział 12 pracy doktorskiej stanowi zwieńczenie całej pracy. Została tu przedstawiona ilościowa analiza wyników symulacji numerycznych. Wszystkie przeprowadzone symulacje uwzględniały monitorowanie istotnych parametrów, takich jak moc turbiny (P_w), sprawność turbiny (η_t), sprawność samej rury ssącej (η_{rs}), oraz Swirl number (S_n), który jest kluczowy w ocenie redukcji kawitacyjnych wirów sznurowych. W ramach analizy przeprowadzono także obliczenia rozkładu ciśnienia statycznego w rurze ssącej, co pozwoliło na ocenę skuteczności różnych konfiguracji geometrycznych żeber w wyeliminowaniu stref stagnacji i poprawie przepływu. Doktorant zwrócił uwagę na znaczne zróżnicowanie wyników uzyskanych z zastosowanych w obliczeniach modeli turbulencji, z których model $k-\omega$ okazał się najodpowiedniejszy do symulacji. Wyniki te zostały porównane z rzeczywistymi danymi eksperymentalnymi, co potwierdziło wysoką jakość dopasowania uzyskanych wyników (błąd pomiędzy danymi eksperymentalnymi a numerycznymi nie przekraczał 1,5%). Wnioski z tych symulacji pozwoliły na wybór najbardziej efektywnych konfiguracji geometrycznych żeber, które najlepiej wpływają na poprawę stabilności przepływu i zmniejszenie intensywności zjawiska kawitacji w turbinie. W rozdziale omówiono także szczegółowo proces walidacji modelu numerycznego, który uzyskał pozytywne wyniki porównawcze z danymi wyznaczonymi na podstawie eksperymentu.

3. Merytoryczna ocena pracy

Turbiny wodne są urządzeniami przepływowymi, które umożliwiają konwersję energii potencjalnej i kinetycznej wody na energię mechaniczną, a następnie elektryczną. Stanowią one fundament współczesnej energetyki wodnej. Wykorzystywane są w różnych typach elektrowni, takich jak elektrownie przepływowe, zbiornikowe oraz szczytowo-pompowe. Projektowane są

tak, aby adaptować się do zmiennych warunków hydrologicznych oraz wahań zapotrzebowania na energię elektryczną, przy czym ich optymalna eksploatacja wiąże się z szeregiem wyzwań technicznych. W szczególności koniecznością minimalizacji strat energetycznych oraz eliminacji niekorzystnych zjawisk towarzyszących skrajnym warunkom pracy, co stanowi kluczowe aspekty efektywnego wykorzystania tego rodzaju turbin wodnych.

W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój w zakresie optymalizacji geometrii łopatek wirników oraz rur ssących, mający na celu poprawę wydajności energetycznej oraz minimalizację strat hydraulicznych. Wzrost wymagań dotyczących efektywności energetycznej, miniaturyzacja urządzeń oraz zmniejszanie ich negatywnego wpływu na środowisko naturalne, skłania inżynierów do poszukiwania nowych, bardziej efektywnych rozwiązań konstrukcyjnych. Zastosowanie nowoczesnych narzędzi obliczeniowych, w tym obliczeniowej mechaniki płynów (CFD), umożliwia dokładniejsze modelowanie przepływów i projektowanie konstrukcji dostosowanych do specyficznych warunków pracy turbin. Tego rodzaju innowacje prowadzą do znacznej poprawy efektywności energetycznej systemów hydroenergetycznych.

Niemniej jednak, redukcja wymiarów turbin oraz zwiększanie prędkości obrotowej wirników wiąże się z ryzykiem intensyfikacji zjawisk kawitacyjnych, które mogą negatywnie wpływać na trwałość i niezawodność urządzeń. Kawitacja, będąca efektem nagłych zmian ciśnienia w cieczy, prowadzi do erozji elementów konstrukcyjnych, zwiększenia drgań mechanicznych oraz obniżenia sprawności całego systemu. Z tego powodu, obok projektowania nowych konstrukcji, istotnym kierunkiem rozwoju pozostaje modernizacja istniejących turbin. Dzięki temu możliwe jest poprawienie parametrów eksploatacyjnych urządzeń bez konieczności ich całkowitej wymiany, co stanowi bardziej efektywną i ekonomiczną alternatywę dla operatorów elektrowni wodnych.

Biorąc pod uwagę, przytoczone powyżej aspekty mogę stwierdzić, że praca doktorska Pana mgr inż. Jacka Bieńkowskiego nt. „*Zwiększenie produktywności turbozespołu wodnego z turbiną Francisa poprzez eliminację lub minimalizację zjawiska kawitacyjnego wiru sznurowego*” doskonale wpisuje się w aktualną i ważną tematykę.

W mojej opinii, przedstawiona do recenzji praca doktorska cechuje się oryginalnością, szczególnie w zakresie identyfikacji problemów związanych z kawitacyjnymi wirami sznurowymi w turbinach wodnych. Temat ten jest aktualny i ma istotne znaczenie praktyczne dla poprawy wydajności elektrowni wodnych, szczególnie tych wykorzystujących turbiny typu Francisa. Innowacyjne podejście do rozwiązania tego problemu przez modyfikację konstrukcji rury ssącej (z zastosowaniem żeber stabilizujących) zasługuje na uwagę.

Autor pracy zastosował szeroki wachlarz metod badawczych, łącząc badania numeryczne (CFD) z badaniami eksperymentalnymi przeprowadzonymi w funkcjonującej elektrowni wodnej. Walidacja modeli numerycznych na podstawie rzeczywistych danych z elektrowni Pilchowice I oraz analiza wyników symulacji numerycznych są mocnymi stronami tej pracy. Autor przeprowadził również analizę wymiarową i zastosował metody analizy

statystycznej oraz ekonometrii w celu opracowania zależności między parametrami konstrukcyjnymi a efektywnością turbiny.

Propozycja modyfikacji konstrukcji rury ssącej poprzez zastosowanie żeber stabilizujących jest interesującą koncepcją, której implementacja może poprawić wydajność turbiny w warunkach niepełnego obciążenia. Wyniki symulacji oraz przeprowadzone badania eksperymentalne mają bezpośrednie zastosowanie w przemyśle hydroenergetycznym, co zwiększa wartość praktyczną pracy.

Praca zawiera obszerny przegląd literatury dotyczącej zarówno teorii kawitacji, jak i metod ograniczania wirów kawitacyjnych. Autor precyzyjnie odnosi się do różnych podejść, takich jak metody aktywne i pasywne, oraz omawia ich zastosowanie w kontekście turbin wodnych. Przegląd literatury jest dobrze udokumentowany i świadczy o dogłębnej znajomości tematu.

Praca jest dobrze zorganizowana, a prezentacja wyników jest klarowna. Objasnienia teoretyczne i wyniki badań są przedstawione w sposób przystępny, choć niektóre fragmenty mogłyby być bardziej skrócone, zwłaszcza w sekcjach dotyczących obliczeń i szczegółowych analiz numerycznych. Język pracy jest fachowy, ale w niektórych miejscach wymaga dokładniejszego przeanalizowania.

Należy podkreślić, że przedstawione wyniki badań wymagały dużego nakładu pracy i były bardzo czasochłonne. Temat pracy jest aktualny i perspektywiczny. Prowadzone przez Doktoranta badania mogą być wykorzystane przy projektowaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych turbozespołów. Podsumowując, całość rozprawy oceniam pozytywnie.

4. Uwagi szczegółowe

Do najważniejszych uwag szczegółowych zaliczam następujące:

1. Pod względem redakcyjnym rozprawa jest napisana bardzo starannie. Jako drobne błędy edytorskie należy wskazać:

1. Str. 11 „Główną zaleta...”, powinno być „główną zaletą”.
2. Należy unikać zdań wielokrotnie złożonych np. str. 11 – „Praca turbin z pojedynczą regulacją przy niepełnym, zatem w warunkach pozaoptimalnych często powoduje powstawanie niekorzystnego zjawiska jakim jest tworzenie się kawitacyjnych wirów sznurowych, które są odpowiedzialne za zwiększone drgania, skutkując szybszą degradacją części wirujących i łożysk i zwiększając koszty eksploatacji.”
3. Str. 11– „w warunkach niepowodujących ich powstawanie”, powinno być „ich powstawania”.
4. Str. 12 „rozwiązanie powodowałoby utratę energii kinetycznej opuszczającej wraz z cieczą wirnik,...” szyk zdania powinien być inny.
5. Str. 18 „poszczególnych modułów krzywka ssącego” – raczej powinno być „krzywaka”?

6. Str. 19 „filarowania konstrukcji, obniżającą znacznie sprawność odzysku energii kinetycznej.” Powinno być raczej „koniecznością filarowania konstrukcji, które powoduje znaczne obniżenie sprawność odzysku energii kinetycznej”.
7. To stwierdzenie pojawia się w kilkunastu miejscach w pracy, zamiast napisać „przedstawiono” jest „przestawiono”. (str. 85, str. 103, str. 106, str. 133)
8. Str. 21. Proszę o wyjaśnienie tego fragmentu tekstu: W stożkowej prostoosiowej rurze występują straty zależne od względnej długości rury i jej kąta rozszerzenia: wewnętrzne w postaci strat tarcia i rozszerzenia, wylotowa.
9. Czy określenia kąt rozwarcia i kąt rozszerzenia są tożsame? Jeżeli nie, to powinno to być jasno wyjaśnione w tekście.
10. Str. 22 „Z analizy wykresu można zaobserwować...” raczej – dokonując analizy wykresu...
11. Str. 27 „...w miarę zwiększania się przekrojów poprzecznych rury ssącej”, raczej mamy jeden przekrój poprzeczny, którego geometria się zmienia.
12. Str. 30 pierwszy akapit brak kropki na końcu zdania.
13. Str. 38. Stwierdzenie „był zbyt daleko oddalony od zawirowania” nie jest określeniem technicznym.
14. Str. 39 „wraz z zespołem naukowców”, powinno być „zespołem”.
15. Str. 41 „w przypadku pracy przy małej obciążeniu”, powinno być „przy małym obciążeniu”.
16. Str. 44 „w zależności od punktu pracy i możliwość wyłączenia”, powinno być „możliwości”.
17. Str. 50 „Zespół naukowców kierowany przez prof. Susan–Resiga R. wniosła znaczący wkład”, w tym zdaniu powinno być słowo „wniósł”.
18. Str. 52 „sprawność i straty w rurze ssącej.”, powinno być „... rurze ssącej.”
19. Str. 54 „Będzie miało to wpływ starty w produkcji energii elektrycznej” brakuje wyrazu „na”.
20. Str. 55. Proszę o wyjaśnienie sensu tego zdania „Geometria zmodyfikowanej piasty charakteryzowała się w każdym badanym przypadku modyfikacja lub dodatkiem stożka (opływki) zamiast płaskiego kształtu.”
21. Str. 56. „Zoptymalizowana piasta była w stanie zmniejszyć amplitudę międzyszczytową i częstotliwość dominującą odpowiednio o 33% i 25%.” Raczej piasta, jako element złożonej konstrukcji nie ma możliwości wykonywania pewnych czynności.
22. Str. 67. „Wewnątrz korpusu znajdują się dwa dwie galerie” to dwa czy dwie galerie?
23. Str 69 „Wydatek poszczególnych sztolni obiegowej, w warunkach maksymalnego poziomu piętrzenia wynosi 111 m³/s.”, powinno być „obiegowych”?
24. W tabeli 5.1 Doktorant wybiegł trochę w przyszłość zapisując rok budowy generatora DFME na rok 7014?
25. Str. 75. „na celu identyfikację przyczyny występowania *zburzeń* podczas pracy turbiny...”, powinno być „zaburzeń”?
26. Str. 84 „Widoczne zmiany ciśnienia sugerują, że obserwowane zjawisko ma charakter hydrauliczny i *wynikaj* ze zmiany kąt otwarcia kierownicy – wzrost strat w derywacji ciśnieniowej.” Proszę o wyjaśnienie sensu tego zdania?
27. Str. 85. "Czujniki drgań dokonują pomiaru..." jest uproszczeniem i skrótem myślowym.



- "Pomiarów dokonano z użyciem czujników drgań" jest bardziej formalne i wskazuje na proces pomiaru, w którym czujniki są elementami systemu pomiarowego.
28. Str. 86. „Obserwując przebiegi drgań w czasie można zaobserwować...”
29. Str. 90. „turbozespołu TZ-2 przy w różnych warunkach pracy” proszę o decyzję czy „przy” czy „w”?
30. Str. 92. „Hinze zdefiniował przepływ turbulentny jest nieuporządkowany ruch cieczy,...” oprócz braku poprawności stylistycznej to jeszcze w tym zdaniu wkradła się pewna niespójność, a mianowicie: Nie wszystkie wielkości fizyczne w przepływie turbulentnym są losowe. Przepływ turbulentny charakteryzuje się częściowo deterministycznymi i częściowo losowymi fluktuacjami wielkości, takimi jak prędkość, ciśnienie czy energia kinetyczna. W rzeczywistości można wyodrębnić składową średnią i losową fluktuację za pomocą analizy Reynoldsowskiej.
31. Str. 96. „...zastosowano zagęszczenie siatkę w obszarach newralgicznych” powinno być „siatki”
32. Str. 99. „W drugiej części badań analizowano rozwiązania służące do ograniczenia powstawania zjawiska wirów sznurowych w celu identyfikacji rokującego, który zostanie wdrożony w rzeczywistej turbinie.”
33. Str. 99. „W symulacjach jako ciecz robocza użyto czystą wodę o parametrach...”
34. Str. 109. „Analiza nie wykazała *tez* istotnych zmian w parametrach pomiędzy poszczególnymi modelami turbulencji.”
35. Str. 126. „strefa o obniżonej prędkości zlokalizowana wewnętrznej części dyfuzora” brakuje „w”?
36. Str. 128. „...na dobór rozwiązania *problemy* z zakresu metod pasywnych.”
37. Str. 134. „Najkorzystniejszy wpływ na redukcję zjawiska kawitacyjnych wirów sznurowych przyniosło *wstawienie* żeber stabilizujących do rury ssącej.” Można użyć innego bardziej technicznego określenia.
38. Str. 145. „warunkuje *poprawą* pracę rury ssącej”, powinno być „poprawną”.
39. Str. 145 „przedstawiono przekroje poprzeczne przez rurę *ssąca*”, powinno być „rurę ssącą”.
40. Str. 173. „...można określić zależność współczynniki występujące we wzorze (11.30)”?
41. Str. 175. „Jak można zauważyć błędy obliczenia wartości z modelu matematycznego są mniejsze”?
42. Str. 176. „..., na podstawie których zostaną wybrane modele najlepiej rokujące celów odniesieniu do zastosowania rozwiązania problemu”?
43. Str. 201. „Kolejne prace badawcze powinny koncentrować się na:
- symulacji zastosowania połączenia zastosowania żeber z zatłaczaniem powietrza (metoda hybrydowa).” Stwierdzenie to wymaga wyjaśnienia.

Oprócz błędów edycyjnych, które zostały przedstawione powyżej, a które w żaden sposób nie wpływają na merytoryczną wartość pracy, pozostają jeszcze kwestie o charakterze dyskusyjnym.

- 1) W rozdziale 9, Autor przedstawia szereg zmiennych wymiarowo niezależnych i wyznacza iloczyny bezwymiarowe $\pi_1 - \pi_{10}$. Dla π_2 obliczenia obarczone są błędami.

Proszę o sprawdzenie i wyjaśnienie, czy błędy te nie będą miały wpływu na końcowe wyniki.

- 2) Na rysunkach 6.17 i 6.18 przedstawiono zależność $\alpha = f(P)$, czyli kąta otwarcia łopatek kierownicy turbiny od mocy turbiny P? Nie zostało to jasno opisane w tym podpunkcie pracy. Brakuje również informacji czy takie badania były prowadzone na stanowisku pomiarowym i czy wyniki były ewentualnie porównywane z wynikami badań symulacyjnych?
- 3) W punkcie 2.7, Doktorant stwierdza, że turbiny zbliżonego typu wykonywane przez różnych producentów mogą wykazywać różnice w odporności na występowanie kawitacji, a niekiedy nawet pewne odmiany danego typu, tego samego wytwórcy różnią się dosyć znacznie od siebie pod względem własności antykawitacyjnych.

Jak zdaniem Doktoranta można poprawić proces technologiczny, aby zapewnić powtarzalność produkcji tych elementów?

Jak już nadmieniałem wcześniej przedstawione uwagi nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy. Praca ma w dużej mierze charakter symulacyjny potwierdzony badaniami eksperymentalnymi, a przedstawione rozwiązania konstrukcyjne mają potencjał aplikacyjny. Doktorant wykazał się wiedzą z zakresu planowania i przeprowadzania eksperymentów, mechaniki płynów i prowadzenia złożonych badań numerycznych. Według mojej opinii Autor rozprawy podjął się rozwiązania aktualnego problemu naukowego, a postawiony przez Niego cel naukowy został osiągnięty.

5. Ocena końcowa pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgra inż. Jacka Bieńkowskiego dotyczy aktualnego zagadnienia badawczego związanego z analizą zjawisk przepływowych zachodzących w turbozespołach wodnych z turbiną Francisa i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Analiza wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych została przeprowadzona prawidłowo. Sformułowany cel pracy został osiągnięty. Praca świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym Autora.

Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, a także umiejętnościami samodzielnego prowadzenia badań naukowych i interpretacji wyników.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Jacka Bieńkowskiego pt. **„Zwiększenie produktywności turbozespołu wodnego z turbiną Francisa poprzez eliminację lub minimalizację zjawiska kawitacyjnego wiru sznurowego”** spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r., poz. 1571) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Stanisław Prania

