

Prof. dr hab. inż. Marian Mokwa

Wrocław, 05. 02. 2025 r.

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Instytut Inżynierii Środowiska

RECENZJA
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr. inż. Jacka Bieńkowskiego

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

Promotor: dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz, prof. uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Przemysław Szulc

Opiekun z ramienia przedsiębiorstwa: dr hab. inż. Przemysław Janik, prof. uczelni

Słowa kluczowe rozprawy: turbina Francisa, kawitacyjny wir sznurowy, rura ssąca.

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została sporządzona na wniosek Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Politechniki Wrocławskiej z dnia 13 listopada 2024 roku (Uchwała nr 55/03/RDND08/2024-2028). Pismo z dokumentacją i pracą doktorską otrzymałem w dniu 04.12.2024 roku.

Na podstawie Uchwały nr 22/2/2024-2028 Senatu PWr z dnia 24 października 2024 r. zostałem wyznaczony na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Panu mgr. inż. Jackowi Bieńkowskiemu w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Ocena jest sporządzona z uwzględnieniem wymagań ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym z zakresu sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.) oraz Rozporządzenia MNiSzW z dnia 19.01.2018 r. w sprawie szczególnego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadaniu tytułu (Dz. U. poz. 261).

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia06.02.2025.....

Mok

2. Informacja o Autorze rozprawy

Mgr inż. Jacek Bieńkowski, zatrudniony jest w spółce TAURON Ekoenergia sp. z o.o. z siedzibą w Jeleniej Górze, która należy do Grupy TAURON na stanowisku Dyrektora Departamentu Inwestycji.

Autor rozprawy jest specjalistą w dziedzinie energetyki, posiadającym ponad 30-letnią praktykę zawodową, z czego 17 lat poświęcił odnawialnym źródłom energii. Jego doświadczenie zawodowe obejmuje również prowadzenie projektów badawczo-rozwojowych (B+R), co pozwoliło mu na pogłębienie wiedzy praktycznej i teoretycznej w tej dziedzinie. W latach 2020-2024 autor kształcił się na Szkole doktorskiej Politechniki Wrocławskiej w ramach Programu "Doktorat wdrożeniowy", który łączył naukę z praktyką zawodową.

3. Tematyka rozprawy

3.1. Wprowadzenie, opis problemu

Energetyka wodna to jedno z najstarszych i największych źródeł OZE. Ponad połowa energii z OZE na świecie powstaje w elektrowniach wodnych (przepływowych, zbiornikowych, szczytowo-pompowych). Ich burzliwy rozwój przypada na koniec XIX wieku i pierwszą połowę XX wieku. Historycznie, uważa się, że pierwsza wybudowana elektrownia wodna na świecie powstała w 1895 roku przy wodospadzie Niagara. Zbudował ją Tesla razem z Westinghouse'm. Wg „wiedzy Autora rozprawy” również na ziemiach będących obecnie w granicach Polski powstawały elektrownie wodne, przykładem jest najstarsza zawodowa elektrownia wodna w Leśnej wybudowana w 1907 roku.

W doniesieniach literaturowych pojawiają się również zapisy, że elektrownia w Gubinie została wybudowana już 1905 roku na stopniu wodnym piętrzącym wody Nysy Łużyckiej, dzielącej dziś Gubin na polską i niemiecką część. Od 1905 roku elektrownia produkowała energię elektryczną dzięki 3 turbinom Francisa. Jej łączna moc wynosiła 1 MW. Dwie z nich dostarczały energię dla miasta, a jedna dla prywatnego zakładu młynarskiego. W 1925 roku dołożono pierwszą turbinę Kaplana. Podczas modernizacji w latach 70. XX w. zdemontowane zostały 3 turbiny Francisa i zainstalowane kolejne 2 turbiny Kaplana. Do dziś w elektrowni działają 3 turbiny Kaplana. W innym miejscu (<http://www.energa-hydro>) podano, że pierwsza elektrownia wodna Struga na ziemiach polskich powstała w 1896 roku w Soszycy (250 kW) na rzece Słupi oraz elektrownia Kamienna na rzece Drawie, w której od 1898 r. pracują dwie turbiny Francisa. Ponieważ informacja o najstarszej zawodowo elektrowni powstałej na ziemiach będących obecnie w granicach Polski pojawiła się w rozprawie, powinno to zostać zweryfikowane i poddane analizie kryterialnej.

Podstawą produkcji energii elektrycznej w energetyce wodnej są turbiny wodne. Ze względu na zasadę działania rozróżnia się turbiny wodne akcyjne (Peltona) i reakcyjne (Francisa, Kaplana i pokrewne). Wśród turbozespołów wodnych na świecie ponad połowę stanowią turbozespoły typu Francisa, dlatego problemy związane z ich eksploatacją stanowią ważne zagadnienie w obszarze wytwórców, projektantów i wykonawców maszyn oraz urządzeń dla energetyki wodnej.

Na świecie przykładem zastosowania turbin Francisa, to między innymi elektrownia na rzece Itaipu (Brazylia, 20 x 700 MW), elektrownia Guri (Wenezuela, 10 turbin, każda o mocy 730 MW), czy też Tama Trzech Przełomów (Chiny) największa elektrownia wodna na świecie, która jest wyposażona w 32 hydrozespoły z turbinami Francisa, każdy o mocy 700 MW.

Zaletą turbin Francisa jest jej uniwersalność, co pozwala na produkcję i montaż dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych elektrowni wodnej. Występują w orientacji pionowej lub poziomej.

Dodatkowo mogą być w komorze otwartej bądź zamkniętej oraz spiralne, bliźniacze i wielowirnikowe.

Najważniejsze elementy, z których zbudowana jest turbina Francisa to: kierownica, wirnik, rura ssąca, obudowa spiralna (opcjonalnie).

Bardzo ważnym komponentem turbiny reakcyjnej Francisa jest rura ssąca, która pełni dwa istotne zadania: pozwala na wykorzystanie różnicy wysokości między wirnikiem a poziomem wody dolnej oraz na odzyskanie energii kinetycznej wody opuszczającej wirnik. Odpowiednie parametry konstrukcyjne rury ssącej mają decydujący wpływ na wysoką sprawność w całym zakresie funkcjonowania turbiny Francisa. Prace badawcze w tym obszarze prowadzone były od lat, co przedstawione zostało przez Autora w przeglądzie literatury. Jednak na ich podstawie można stwierdzić, że nie ma jednej uniwersalnej metody wyznaczającej optymalne kształty rury ssącej turbiny Francisa. Dlatego w pracy doktorskiej Autor zajął się określeniem wpływu parametrów konstrukcyjnych rury ssącej oraz czynników zewnętrznych na proces ograniczenia zawirowania sznurowego, a następnie wybór racjonalnego i skutecznego rozwiązania problemu, które może zostać zaimplementowane w EW Pilchowice, w której zatrudniony jest Autor.

3.2. Opis rozprawy

Opis rozprawy został przedstawiony przez Doktoranta w „Streszczeniu” pracy doktorskiej, w którym Autor sformułował zakres i efekt dysertacji:

„W pracy realizowanej w ramach Programu - Doktorat wdrożeniowy- przeanalizowano zagadnienie powstawania kawitacyjnych wirów sznurowych, występujących w elektrowni wodnej Pilchowice I, podczas pracy turbiny Francisa w warunkach niepełnego obciążenia. Efektem dysertacji jest propozycja rozwiązania w postaci zabudowy w rurze ssącej turbiny żeber stabilizujących, które powyższy problem likwidują, rozszerzając jednocześnie obszar funkcjonowania turbiny o możliwość bezpiecznej pracy w warunkach pozaoptymalnych. Zakres dysertacji objął przeprowadzenie badań z użyciem numerycznej mechaniki płynów CFD oraz badań rzeczywistych w elektrowni. Wykonana została także analiza wymiarowa, a na podstawie opracowanego modelu numerycznego poddanemu walidacji, przeprowadzono symulacje numeryczne, których wyniki poddano interpretacji jakościowej i ilościowej. Praca objęła także wykonanie badań numerycznych zdeterminowanych planem eksperymentu, w celu określenia wpływu parametrów geometrycznych żeber, takich jak: ilość, wysokość i długość, na proces gaszenia sznurowych wirów kawitacyjnych i produkcję energii elektrycznej. Wykorzystując zasady analizy statystycznej oraz ekonometrii opracowane zostały zależności łączące cechy geometryczne żeber z parametrami pracy turbiny – osiąganą mocą i intensywnością zawirowania sznurowego w rurze ssącej. Wyznaczone zależności mają unikalny charakter, których autor pracy nie odnalazł w literaturze opisującej przedmiot badań”.

3.3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Autor w spisie literatury wyszczególnia 95 pozycji stosując układ chronologiczny (autor, tytuł, wydawnictwo, rok). Zazwyczaj w pracy magisterskiej, rozprawie doktorskiej, na liście odniesień bibliograficznych stosuje się styl harwardzki (autor, rok, tytuł, nazwa wydawnictwa – np. [1] Bieńkowski J., (2024). *Zwiększenie produktywności turbozespołu z turbiną Francisa poprzez eliminację lub minimalizację zjawiska kawitacyjnego wiru sznurowego*. Rozprawa doktorska. Politechnika Wrocławska).

W zdecydowanej większości są to prace naukowe i podręcznikowe oraz opracowania techniczne. Wśród pozycji literatury znajdują się 73 pozycje anglojęzyczne i 22 zredagowane w języku polskim. 38 pozycji opublikowano w ostatnich 10 latach, a 16 przypada na okres 2020 – 2024 rok.

Odwołanie do pozycji literatury odbywa się zgodnie z kolejnością ich występowania w tekście rozprawy. Analiza dokonywana jest na bieżąco, w poszczególnych częściach rozprawy. W tekście brak jednak odwołania do pozycji 50, 53, 58, 59, 60, 81, 82, 92. Przegląd literatury obejmuje 57 pozycji. Przedstawiony został w dwóch obszarach tematycznych.

Pierwszy dotyczy „Znaczenie rur ssących w pracy turbin reakcyjnych”, gdzie Autor dokonuje oceny różnych współczesnych kształtów rur ssących stosowanych w turbinach Francisa (stożkowe, hydrokoniczne, krzywoosiowe) w aspekcie ich sprawności.

Obszar drugi przeglądu literatury obejmuje „Metody ograniczania zjawiska kawitacyjnych wirów sznurowych”, które można podzielić na metody aktywne i pasywne. Rozwiązania aktywne, to takie, w których można sterować intensywnością zawirowania, niezależnie od położenia punktu pracy maszyny. Metody aktywne polegają głównie na dostarczeniu niewielkiej ilości powietrza lub wody w obszar zawirowania, najczęściej za pomocą dodatkowych wtryskiwaczy. Jak wynika z dokonanego przeglądu literatury w niektórych przypadkach dostępne badania nad wtłaczaniem powietrza dały sprzeczne wyniki, a praktyczne wdrożenie tych metod nadal stanowi poważne wyzwanie, wymagające dokładnej wiedzy o dynamice układu i umiejętności sterowania tym rozwiązaniem w czasie rzeczywistym. Natomiast metody pasywne oddziałują na pracę maszyny w całym jej zakresie funkcjonowania i polegają na wstawianiu dodatkowych elementów konstrukcyjnych, najczęściej w rurę ssącą, które ograniczają przepływ wody z krętem. Jednak zastosowanie tej metody w istniejących rurach ssących może okazać się bardzo trudne, lub wręcz niewykonalne. Główną przeszkodą, w tym przypadku, są prace konstrukcyjne, które należałoby wykonać w użytkowanych, często przez długie lata maszynach. Jak wynika z przedstawionego przez Autora przeglądu metod pasywnych istnieje wiele technik redukcji wirów sznurowych z zastosowaniem różnego rodzaju elementów konstrukcyjnych umieszczanych najczęściej w rurze ssącej. Przykładowo należą do nich: modyfikacja piasty wirnika – wydłużenie, rowkowanie, zastosowanie opływki, dodatkowy dyfuzor, regulowana kryza, oraz żebra stabilizujące w rurze ssącej, które są jednym ze sposobów najbardziej rokujących w zakresie redukcji wirów sznurowych. Dlatego też, w ramach prowadzonych przez doktoranta studiów, Autor skupia się na pomijanym w literaturze aspekcie opisującym zależności parametrów konstrukcyjnych żeber na osiąganą moc turbozespołu i wolumen energii, co w przypadku przedsiębiorstwa energetycznego ma podstawowe znaczenie. Istotnym aspektem jest także podjęta próba opisanie zależności matematyczną uzyskiwanej mocy od parametrów żeber takich jak: ilość, długość i szerokość. Inną przyczyną podjęcia przez Autora badań nad tą techniką jest fakt, że przedmiotowa turbina Francisa zabudowana jest w ponad stuletniej elektrowni. Dostęp do elementów turbiny jest utrudniony, ale istnieją możliwości techniczne zabudowy w rurze ssącej uźebrowania.

Analiza źródeł literaturowych jest przeprowadzona wzorowo. Przedstawione studia literaturowe świadczą o umiejętności korzystania z istniejącej wiedzy i wyciągania z niej właściwych wniosków. Bardzo dobrze oceniam dobór źródeł, jak i ich wykorzystanie.

4. Cel, teza i zakres rozprawy

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy stwierdzić można, że nie ma jednej uniwersalnej metody ograniczającej powstawanie lub eliminowanie kawitacyjnego wiru sznurowego tworzącego się podczas przepływu z krętem - z jakim mamy do czynienia w rurze ssącej turbiny Francisa. Zarówno metody aktywne jak i pasywne mają szereg zalet, ale także i wad, dlatego celem pracy doktorskiej jest określenie wpływu zjawisk występujących w rurze ssącej turbiny stanowiącej przedmiot badań na stabilność jej parametrów wraz z identyfikacją warunków i zasięgu występowania wiru kawitacyjnego. Biorąc pod uwagę wdrożeniowy charakter doktoratu, celem pracy jest znalezienie najbardziej korzystnego rozwiązania do

not

zastosowania w turbinie Francisa, uwzględniając także rzeczywiste warunki w elektrowni i aspekty ekonomiczne. Dlatego też po analizie literatury i przeprowadzeniu badań wstępnych cel pracy skupia się na zastosowaniu jednej z metod pasywnych, a mianowicie żeber umieszczonych w rurze ssącej turbiny. Rozwiązanie takie jest możliwe do zastosowania ze względów konstrukcyjnych w EW Pilchowice I.

Główne cele pracy zostały zdefiniowane jako:

- Rozpoznanie oraz analiza zjawisk przepływowych, występujących w rurze ssącej turbiny Francisa będącej przedmiotem badań.
- Opracowanie metodologii modelowania powstających zjawisk przy wykorzystaniu technik CFD.
- Określenie wpływu parametrów geometrycznych żeber na powstawanie procesji różnych struktur wirowych i osiąganą moc oraz sprawność turbiny.
- Wybór optymalnego rozwiązania z określeniem parametrów konstrukcyjnych, które zostanie zaimplementowane w elektrowni wodnej Pilchowice I.

Przedstawiony cel pracy jest mocno ukierunkowany na wdrożenie, co koresponduje z zastosowaniem wyników badań naukowych w sferze gospodarczej.

Na tej podstawie została sformułowana teza pracy:

Istnieje zbiór parametrów geometrycznych żeber stabilizujących zabudowanych w rurze ssącej turbiny Francisa umożliwiający ograniczenie zjawiska kawitacyjnych wirów sznurowych z zachowaniem wysokich parametrów produkcyjnych turbiny.

Zakres pracy, umożliwiający udowodnienie sformułowanej tezy pracy stanowi:

- przegląd literatury,
- analiza i opis procesów przepływowych zachodzących podczas pracy turbin wodnych typu Francisa ze szczególnym uwzględnieniem przepływu w rurze ssącej oraz warunków powstawania kawitacyjnych wirów sznurowych,
- przeprowadzenie pomiarów energetycznych turbiny typu Francisa na stanowisku pracy w elektrowni wodnej,
- opracowanie modelu numerycznego układu przepływowego, mającego na celu analizę zjawisk przepływowych występujących w rurze ssącej,
- walidacja modelu numerycznego z danymi pomiarowymi uzyskanymi z rzeczywistego obiektu przemysłowego,
- analiza przepływu w istniejącym rozwiązaniu technicznym EW Pilchowice I,
- wykonanie badań wstępnych, w celu wyboru najkorzystniejszej metody ograniczenia powstawania kawitacyjnych wirów sznurowych,
- przeprowadzenie analizy wymiarowej oraz określenie parametrów geometrycznych żeber wpływających na ograniczenie powstawania wirów kawitacyjnych,
- zaplanowanie eksperymentu na potrzeby symulacji numerycznych,
- opracowanie i przygotowanie modeli układów do badań zasadniczych, zgodnie z planem eksperymentu,
- wykonanie symulacji numerycznych według przygotowanego planu eksperymentu,
- opracowanie modelu matematycznego zależności mocy turbiny i Swirl number od parametrów geometrycznych żeber,
- analiza otrzymanych wyników i sformułowanie wniosków – wybór konstrukcji żeber do zastosowania w turbinie wodnej Francisa.

Korespondujący z tezą pracy jej zakres wynika z wniosków wyciągniętych przez Autora z przeglądu literatury oraz własnych doświadczeń. Można więc stwierdzić,

że zakres rzeczowy rozprawy odpowiada sformułowanym tezom oraz pozwala na osiągnięcie wyników umożliwiających ich dowiedzenie.

5. Zawartość rozprawy doktorskiej (Informacja o rozprawie doktorskiej - Charakterystyka poszczególnych rozdziałów)

Oceniając porządek recenzowanego materiału stwierdzam, że układ pracy, jej struktura, podział treści, kolejność rozdziałów są prawidłowe. Praca zawiera wszystkie rozdziały wymagane w rozprawach doktorskich. W spisie treści rozprawy wyszczególniono 13 rozdziałów głównych w tym 35 podrozdziałów, które zawierają 20 punktów. Cztery początkowe rozdziały główne pracy (1. Wstęp, 2. i 3. Przegląd literatury, 4. Cel, teza i zakres pracy) zostały scharakteryzowane w pkt. 3. i 4. tej recenzji. Zawartość merytoryczna kolejnych rozdziałów przedstawia się następująco:

Rozdział 5, - dotyczy „Opisu przedmiotu badań”. Autor prezentuje stopień wodny wraz ze zbiornikiem Pilchowice administracyjnie usytuowanym w obrębie miejscowości Pilchowice, gmina Wleń, powiat Lwówek Śląski, województwo dolnośląskie. W skład stopnia wodnego Pilchowice wchodzi: zaporą kamienno-betonową, zbiornik retencyjny, przelew, upust, sztolnia, ujęcia rurociągów turbinowych z doprowadzeniem wody do turbozespołów, elektrownia wodna. Przedmiotem badań Autora jest jedna z turbin zainstalowanych w elektrowni. Obecnie w elektrowni zainstalowanych jest pięć turbin. Są to turbiny Francisa w układzie pionowym produkcji ZRE Gdańsk, szósta zmodernizowana w roku 2013 firmy J. M. Voith, to turbina Francisa o osi poziomej. Przedmiotem badań jest turbozespół TZ-2.

W skład turbozespołu wchodzi:

- spirala stalowa, częściowo zabetonowana,
- kierownica typu Finka z regulacją zewnętrzną,
- wirnik turbiny wykonany metodą spawaną (łopatki $z = 15$ szt.),
- prostoosiowa rura ssąca o kącie rozwarcia $2\theta = 10^\circ$.

Do badań Autor wykorzystał dane dostępne w systemie nadzoru i sterowania SCADA (z ang. *Supervisory Control And Data Acquisition*) zainstalowanego w EW Pilchowice I. W celu oceny pracy turbiny wykonano pomiary energetyczne osiąganych parametrów w warunkach pracy optymalnej i pozaoptymalnej. W wyniku przeprowadzonych pomiarów można było stwierdzić, że badana turbina osiąga wysoką sprawność. Obserwując przebiegi drgań w czasie, można zaobserwować znaczną zmianę parametrów dla pozaoptymalnego stanu pracy turbin.

Rozdział 6, - przedstawia „Obliczenia numeryczne”. Autor przyjął jako podstawową metodę badawczą modelowanie numeryczne. Turbiny projektowane są za pomocą nowoczesnego oprogramowania grafiki 3D Solid Edge ST, a także przy użyciu metod modelowania numerycznego przepływu (CFD). Autor zastosował metodę CFD – Computational Fluid Dynamics, która jest techniką używaną do analizy przepływu płynów oraz oddziaływania tych przepływów z otaczającymi powierzchniami.

W celu dokonania kompleksowej oceny struktury przepływu wykonano model całej turbiny. Odwzorowany układ przepływowy zawierał: spiralę wlotową, kierownicę, wirnik, rurę ssącą i komorę wylotową.

Badania numeryczne przepływu w przedstawionym układzie hydraulicznym zrealizowano w oprogramowaniu ANSYS Fluent CFD 2021 R2, natomiast opracowanie wyników reprezentatywnych przeprowadzono w postprocesorze CFD Post 2021 R2.

Ze względu na wykorzystanie symulacji numerycznych model został poddany walidacji. Analiza uzyskanych rezultatów wskazuje, że zastosowany model numeryczny działa poprawnie i z wystarczającą precyzją odzwierciedla pracę turbiny. W związku z tym model CFD można uznać za wiarygodne narzędzie do przewidywania kształtu charakterki eksploatacyjnej turbiny.

Przeprowadzone symulacje numeryczne i sporządzone na ich podstawie charakterystyki potwierdziły poprawność opracowanego modelu numerycznego. Model ten, z dużą dokładnością, przybliży zarówno parametry ilościowe jak i charakter jakościowy zjawisk zachodzących w rurze ssącej turbiny Francisa podczas pracy z obciążeniem częściowym. Praca w tych warunkach generuje powstawanie kawitacji przestrzennej w postaci wiru sznurowego. **Rozdział 7**, - prezentuje „*Analizę jakościową pracy turbiny*”. Analizę struktury przepływu wody przeprowadzono w następujących elementach turbiny: spirala segmentowa, wirnik, kierownica, rura ssąca. Jako P1 przyjęto punkt pracy hydrozespołu TZ2 w jego optimum. Zjęto strukturę przepływu maszyny pracującej w stanie optymalnym, przy otwarciu łopatek kierownicy 85%. Przeprowadzone symulacje dla punktu optymalnego można podsumować następująco: otrzymane wyniki w postaci rozkładów parametrów ciśnienia i prędkości charakteryzują się regularnością, nie ma wyraźnych obszarów separacji przepływu, rozkład ciśnienia jest właściwy, a straty na elemencie regulacyjnym są niewielkie.

Aby określić, a następnie potwierdzić zachodzące zjawiska podczas przepływu wody przez turbinę Francisa przeanalizowano funkcjonowanie maszyny podczas pracy w stanie pozaoptimalnym, tj. przy częściowym obciążeniu. W tym przypadku przeprowadzone symulacje numeryczne ukazały znaczący wir o strukturze spiralnej w rurze ssącej – zjawisko powstania pierścienia wodnego granicznego – kawitacyjnego zawirowania sznurowego.

W następnych przeprowadzonych symulacjach numerycznych przepływu w rurze ssącej skupiono się na znalezieniu skutecznego i racjonalnego rozwiązania w celu ograniczenia lub eliminacji tego niekorzystnego zjawiska

Rozdział 8, - przeprowadzono „*Badania wstępne w zakresie metod ograniczania zjawisk kawitacyjnych wirów sznurowych*”

Badania wstępne przeprowadzono jako symulacje numeryczne. Autor zdecydował się na przeprowadzenie badań w zakresie pasywnych metod ograniczania zjawiska kawitacyjnych wirów sznurowych. Zaletą tych metod jest brak konieczności budowy skomplikowanych instalacji.

Badaniom poddano następujące elementy turbiny:

- deflektora przepływu umieszczonego za wirnikiem w rurze ssącej,
- dodatkowego dyfuzora umieszczonego za piastą wirnika,
- dodatkowego ruchomego cylindra wewnątrz rury ssącej, połączonego z piastą wirnika,
- modyfikację kształtu piasty wirnika w postaci opływki,
- żeber umieszczonych na ścianach rury ssącej.

Podsumowując badania wstępne dotyczące stosowanych pasywnych metod ograniczania zjawiska kawitacyjnych wirów sznurowych stwierdzić można znaczące różnice występujące pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami. Zastosowanie deflektora przepływu nie spowodowało redukcji wiru sznurowego, a ponadto jego obszar uległ zwiększeniu przy silnie nieregularnym przepływie wewnątrz rury ssącej. Wstawienie do rury ssącej dyfuzora, cylindra obrotowego oraz zmiana piasty wirnika na kształt opływowy zmniejszyło obszary stagnacji, a także spowodowało bardziej regularny charakter przepływu, jednak redukcja ta była niewystarczająca. Najkorzystniejszy wpływ na redukcję zjawiska kawitacyjnych wirów sznurowych przyniosło wstawienie żeber stabilizujących do rury ssącej, umieszczonych na ścianach rury. Dlatego też do dalszych prac, celem wyboru najlepszego rozwiązania ograniczającego to niekorzystne zjawisko w EW Pilchowice I, wybrano metodę ożebrowania rury ssącej.

Rozdział 9, - omawia „*Analizę wymiarową mocy na wale turbiny*”. Celem zdefiniowania istotnych parametrów wpływających na pracę turbiny wodnej Francisa z dodatkowymi elementami konstrukcyjnymi w postaci żeber umieszczonych w rurze ssącej przeprowadzono analizę wymiarową.

108

Rozdział 10, - przedstawiono „*Plan eksperymentu*”. Technika planowania eksperymentu pozwala na redukcję liczby analiz, zapewniając jednocześnie wysoką jakość badań. W badaniach zastosowano metodę planowania wielopoziomowego. Wybrano planowanie rotatabilne, które umożliwia wyznaczenie modeli liniowo-kwadratowych. Eksperyment zaplanowano jako trzypoziomowy. Obliczono niezbędną ilość doświadczeń dla eksperymentu.

Rozdział 11, - wykonano „*Analizę wyników symulacji*”. Na podstawie planu eksperymentu, wykonano szereg symulacji numerycznych. Jako dwa podstawowe parametry mające wpływ na ocenę zastosowanych rozwiązań i pracę turbiny Francisa przyjęto osiąganą moc na wale turbiny P_w oraz Swirl numer.

Pierwszy parametr ma bezpośredni wpływ na ilość wyprodukowanej energii elektrycznej. Drugi, Swirl numer, stosunek osiowego strumienia momentu pędu do osiowego strumienia pędu liniowego. S_n określa przepływ cieczy z krętem, ukazując skuteczność zastosowanych rozwiązań w zakresie ograniczania zjawiska kawitacyjnych wirów sznurowych. Wyznaczone przez Autora wzory pozwalają przewidzieć wartość S_n na długości rury ssącej w zależności od parametrów geometrycznych żeber. Na tej podstawie można przewidzieć jak zmiana parametrów konstrukcyjnych żeber będzie wpływała na gaszenie kawitacyjnego wiru sznurowego.

Autor wykazał, że modelowanie numeryczne w mechanice płynów jest wiarygodnym narzędziem badawczym do analizy zjawisk przepływowych, co zostało potwierdzone przez walidację modelu obliczeniowego oraz przeprowadzone symulacje.

Rozdział 12, - przeprowadzono „*Ilościową analizę rezultatów symulacji numerycznej*”. Podczas przeprowadzonych symulacji numerycznych, wykonanych zgodnie z planem eksperymentu, przeanalizowano 15 różnych modeli uźebrowania rury ssącej turbiny Francisa w celu eliminacji zjawiska kawitacyjnych wirów sznurowych, powstających podczas pracy pozaoptimalnej maszyny. Żebra charakteryzowały się różnymi parametrami takimi jak: ilość (od 2 do 9), wysokość (od 0,1 m do 0,368 m) i długość (od 0,659 m do 2,341 m). Po wykonaniu pogłębionych analiz dla wytypowanych modeli przy różnych stopniach otwarcia kierownicy, a w związku z tym podczas pracy przy różnych przepływach, rekomenduje się do zabudowy w rurze ssącej turbiny TZ-2 w EW Pilchowie I żebra stabilizujące zgodnie z modelem RS7. (4 żebra o szer. 0,3 m i dł. 2 m, osiągający drugą pod względem wartości moc, a wartość parametru S_n w większej części rury ssącej było mniejsze niż 0,15).

Rozdział 13, - sformułowano „*Podsumowanie i wnioski końcowe*”. Autor formułuje ogólny wniosek stwierdzający, że główne cele pracy zdefiniowane jako:

- identyfikacja i poznanie zjawisk przepływowych, występujących w rurze ssącej turbiny Francisa będącej przedmiotem badań,
- opracowanie metodologii modelowania powstających zjawisk przy wykorzystaniu CFD,
- określenie wpływu parametrów geometrycznych żeber na powstawanie i precesję struktur wirowych i osiąganą moc oraz sprawność turbiny,
- wybór optymalnego rozwiązania z określeniem parametrów konstrukcyjnych, które zostaną zaimplementowane w elektrowni wodnej Pilchowie I,
zostały zrealizowane.

6. Ocena rozprawy doktorskiej (poziom naukowy, uwagi formalne i merytoryczne)

Zgodnie z Ustawą „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, rozprawa doktorska powinna spełniać następujące warunki:

- „*prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie, albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej*”,

- temat powinien stanowić „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań w sferze gospodarczej lub społecznej oraz oryginalne dokonania artystyczne”.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Jacka Bieńkowskiego powstała w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Doktorant jest pracownikiem Firmy Tauron Ekoenergia, a Jego praca doktorska bazuje na doświadczeniach zawodowych i realizowanych badaniach własnych powiązanych z tematyką rozprawy.

Należy podkreślić, że wybrany przez Doktoranta przedmiot rozprawy bardzo dobrze realizuje oczekiwania stawiane doktoratom wdrożeniowym. Fakt, że Doktorant zatrudniony jest w przedsiębiorstwie zainteresowanym wdrożeniem wyników badań korzystnie wpłynął na prace badawcze i rozwiązania konstrukcyjne podejmowane przez Autora. Wg informacji zawartej w zleceniu recenzji, innowacyjne rozwiązania przedstawione przez Autora w pracy doktorskiej objęte są ochroną wynalazku zapewnioną zgłoszeniem patentowym.

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest usprawnienie pracy turbin Francisa w zakresie zwiększenia ich mocy i sprawności poprzez odpowiednią zabudowę rur ssących.

Analiza parametrów przepływu wody w rurze ssącej potwierdziła, że wpływ kształtów i rozmieszczenia żeber jest powiązany ze zdolnością zmniejszania prędkości obwodowej oraz likwidacji stref obniżonego ciśnienia w rurze ssącej. Autor zaprezentował bardzo dobry warsztat zarówno w sferze koncepcyjnej jak i modelowania numerycznego. W pracy zastosowano najnowsze narzędzia komputerowe, co przełożyło się na wykonanie dużej ilości analiz wariantowych. Szczególną uwagę przykuwa fakt wykonania modeli numerycznych dla wielu wariantów doboru kształtów geometrycznych żeber zabudowanych w rurze ssącej turbiny Francisa. Na podstawie opracowanych przez Autora zależności można stwierdzić, że istnieje zbiór parametrów geometrycznych żeber stabilizujących, który umożliwia eliminację kawitacyjnych wirów sznurowych przy zachowaniu wysokich parametrów produkcyjnych turbiny. Wykorzystując zasady analizy statystycznej Autor wykazał, że największy wpływ na wielkość generowanej mocy na wale turbiny ma ilość zastosowanych żeber k . Kolejnym istotnym parametrem jest wysokość żeber h , natomiast najmniejszy wpływ na wartość generowanej mocy ma długość żeber l , stanowiąc zmienną nadmiarową.

Przyjęta przez Autora metodyka badań umożliwiła wykonanie koniecznych obliczeń oraz symulacji pracy turbiny prowadząc do przygotowania modelu fizycznego oraz prototypu zdolnego do pracy w warunkach rzeczywistych.

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jacka Bieńkowskiego przedstawia indywidualne nowatorskie praktyczne i naukowe osiągnięcia w obszarze optymalizacji pracy turbin wodnych Francisa może być wykorzystana przez innych badaczy oraz producentów turbin w pracach projektowych i wdrożeniowych. Można stwierdzić, że rozprawa doktorska ma, oprócz naukowego, również praktyczny aspekt i wpisuje się w rozwój nowych doskonalących rozwiązań, wzbogacających energetykę wodną.

Struktura pracy jest prawidłowa, a jej zawartość merytoryczna w sposób usystematyzowany i wyczerpujący omawia zagadnienie będące przedmiotem rozprawy. Mimo tego, niektóre rozdziały można zgrupować tematycznie, tak aby struktura pracy była bardziej przejrzysta i ograniczała się do: wstępu, streszczenia, przeglądu literatury, opisu metodologii i omówienia wyników, oraz wnioski. Np. Rozdział 11. „Analiza wyników symulacji” i Rozdział 12. „Ilościowa analiza rezultatów symulacji numerycznej”, dotyczą podobnego zagadnienia, i powinny być zawarte w Rozdziale „Opis metodologii”, który występuje dopiero jako punkt 5.3.5.

Zaleca się również, aby w rozprawie numeracja rozdziałów ograniczona została do trzeciego stopnia (rozdziały, podrozdziały i punkty - 1.1.1.). Jeżeli zachodzi potrzeba wprowadzenia kolejnego podtytułu, to nie numerujemy go, tylko podkreślamy.

Strona estetyczna pracy jest na bardzo dobrym poziomie, choć zdarzają się drobne niedociągnięcia w formie błędów w niekompletnych legendach rycin i wykresów w przeglądzie literatury, polegających na niedostatecznej czytelności opisów sygnowanych raz w języku angielskim innym razem w języku polskim. Pomimo, że rysunki i wykresy stanowią materiał ilustracyjny i są bardzo dobrej jakości, to napisy powinny być czytelne i ujednolicone. Brak jest jednostek w spisie ważniejszych oznaczeń oraz w opisie oznaczeń pod większością wzorów. W tekście rozprawy zdarzają się błędy literowe i gramatyczne np.:

Str. 39 - Papillon B. wraz z zespołem [14, 15] wnieśli opracowali trzy różne systemy...

Rys. 3.3. a) schemat modelu testowanej modelu turbiny.

Str. 39. Moona M. wraz z zespłem naukowców...

Str. 44. ... w przypadku pracy przy małej obciążeniu...

Rys. 3.9. ...FFM z wyszczególnionym przekrój przez generator...

Rys. 3.23. a) przekrój rury ssącej wraz z regulowaną, b) przekrój...

Itd.

Wspomniane w recenzji uwagi nie umniejszają ogólnej wartości pracy, która zasługuje na ocenę pozytywną.

Doktorant posiada dużą wiedzę w zakresie tematyki przedstawionej w rozprawie, ma umiejętność formułowania badań naukowych, zna metodyki prowadzenia badań naukowych i potrafi je wykorzystać przy realizacji doktoratu.

Należy stwierdzić, że główne cele rozprawy zdefiniowane jako, określenie wpływu parametrów geometrycznych żeber na powstawanie i precesję struktur wirowych, wielkość mocy oraz sprawność turbiny i wybór optymalnego rozwiązania z określeniem parametrów konstrukcyjnych, które zostaną zaimplementowane w elektrowni wodnej Pilchowice I, zostały przez Doktoranta osiągnięte.

Z zamieszczonej na końcu rozprawy doktorskiej informacji wynika, że Doktorant widzi dalszą relację z otoczeniem gospodarczym (z przedsiębiorstwem, w którym jest zatrudniony).

Doktorant jednoznacznie wytyczył dalsze kierunki prac badawczych i wdrożeniowych, które powinny koncentrować się na:

- analizie zastosowania innych kształtów i konstrukcji żeber,
- zbadaniu wpływu grubości żeber, wysokości i długości na pracę rury ssącej,
- symulacji zastosowania połączenia żeber z zatłaczaniem powietrza.

Praca doktorska Pana mgr. inż. Jacka Bieńkowskiego spełnia wymagania formalne określone w Ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym”.

Na koniec przedstawienia osiągnięć Autora i walorów pracy chciałbym podkreślić dobre opanowanie warsztatu badawczego i biegłości w stosowaniu oraz interpretacji wyników metod analitycznych w praktyce, a także kompleksowej realizacji postawionych celów.

Życzę Doktorantowi, aby na dalszą drogę pracy naukowej i wdrożeniowej kontynuował z sukcesem swoją pasję badawczą.

7. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę aktualność i znaczenie tematyki rozprawy, sformułowane cele i pytania badawcze, logikę i spójność wyводу, wykorzystane narzędzia badawcze, walory poznawcze, a przede wszystkim walory aplikacyjne wyników przeprowadzonych badań stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jacka Bieńkowskiego pt. „Zwiększenie produktywności turbozespołu z turbiną Francisca poprzez eliminację lub minimalizację zjawiska kawitacyjnego wiru sznurowego” spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom

doktorskim określonym w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (tj. Dz. U. z 2022 r., poz. 574 z późn. zm.).

Wobec powyższego stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie mgr. inż. Jacka Bieńkowskiego do kolejnych etapów przewodu doktorskiego o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

mgr