

Politechnika Łódzka
Instytut Maszyn Przepływowych



dr. hab. inż. Krzysztof Sobczak, prof. uczelni
Politechnika Łódzka
Wydział Mechaniczny
Instytut Maszyn Przepływowych

Łódź, 21 stycznia 2025 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Dawida Zaniewskiego**

zatytułowanej:

Badania układu przepływowego turbiny z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

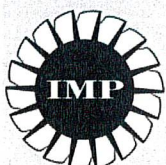
Podstawą opracowania recenzji jest pismo dr. hab. inż. Grzegorza Żywicy, profesora IMP PAN, Zastępcy Dyrektora Instytutu Maszyn Przepływowych im Roberta Szewalskiego, Polskiej Akademii Nauk, z dnia 25 listopada 2024 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Dawida Zaniewskiego pt. „Badania układu przepływowego turbiny z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym”.

Praca powstała w Ośrodku Energetyki Ciepłej, Zakładzie Turbin, Instytutu Maszyn Przepływowych PAN. Promotorem Doktoratu jest dr. hab. inż. Piotr Lampart a promotorem pomocniczym jest dr. inż. Piotr Klonowicz.

2. Charakterystyka i ocena aktualności tematu rozprawy doktorskiej

Przedstawiona od oceny rozprawa doktorska prezentuje opracowaną hybrydową metodę projektowania turbin promieniowych o przepływie dośrodkowo-odśrodkowym z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym. Metoda ta polega na użyciu modelu OD (analiza termodynamiczna i kinematyki przepływu) uzupełnionego o wyniki symulacji trój- i dwuwymiarowych (3D i 2D) przepływu do wyznaczenia strat, w tym strat częściowego zasilania. W oparciu o nią Doktorant opracował projekt i zbudował prototypową turbinę, a następnie przeprowadził na niej badania eksperymentalne, co dostarczyło mu danych do walidacji modelu numerycznego. Zwaliowany model posłużył do wyznaczenia i opisu mechanizmów strat częściowego zasilania.

W obecnym czasie dużo uwagi poświęca się energetyce rozproszonej w tym wykorzystującej odnawialne źródła energii. W sporej części wydajność tych źródeł jest



ul. Wólczańska 217/221, 93-005 Łódź
tel. (+48 42) 631 23 64; w1i12@adm.p.lodz.pl
www.imp.p.lodz.pl

Adres do korespondencji:
ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź



niewielka, więc ich wykorzystanie wymaga małoskalowych lub wręcz mikroskalowych instalacji i urządzeń. Wydajność ta może się również znacząco zmieniać. W związku z tym będąca obiektem prac turbina promieniowa z częściowym zasilaniem i kilkoma (trzema w rozpatrywanym przypadku) niezależnie pracującymi sektorami dyszowymi jest interesującym rozwiązaniem. To, jak i stopniowanie prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym pozwala na zbudowanie kompaktowej maszyny maksymalizującej gęstość mocy. Ma to szczególne znaczenia w napędach pomocniczych i szczytowych oraz w transporcie. Biorąc pod uwagę wspomniane kwestie, można uznać, że tematyka badań jest aktualna i istotna zarówno z poznawczego i utylitarne punktu widzenia.

Idea stopniowania prędkości w postaci stopnia Curtisa jest dość szeroko stosowana i dobrze zbadana. Z kolei stopniowanie prędkości w ramach jednego wirnika, mimo, że znane od ponad wieku, cieszy się dużo mniejszą popularnością. Wynika to z mniejszej sprawności, co z kolei, w pewnych zastosowaniach może być kompensowane zwartością konstrukcji. Rozwiązanie to jest słabo zbadane, co dało Doktorantowi pole do istotnego poszerzenia stanu wiedzy w dziedzinie, w szczególności o mechanizmach strat.

Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera szereg aspektów projektowania, modelowania, eksploatacji i badań eksperymentalnych maszyn przepływowych. Z powyższych względów tematyka recenzowanej rozprawy mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych oraz dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

3. Opis zawartości rozprawy

Rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim. Liczy ona 150 stron i składa się z sześciu rozdziałów. Poprzedzone są one streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz wykazem oznaczeń. Rozprawa zakończona jest bibliografią liczącą 91 źródeł literaturowych, w tym 2 artykułów i jednego wniosku patentowego współautorstwa Doktoranta.

Rozdział 1 „Wstęp” zarysowuje motywację i tematykę pracy osadzając analizowaną, nietypową konstrukcję turbiny w kontekście istniejących rozwiązań, zarówno silników tłokowych jak i turbin ze stopniem Curtisa. Sformułowane zostały trzy cele związane z:

- opracowaniem hybrydowej metody projektowej częściowo zasilanej turbiny promieniowej ze stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym,
- opisem mechanizmu strat częściowego zasilania,
- oraz wyznaczeniem tych strat dla zbadanej nietypowej geometrii stopnia turbinowego.

Sformułowano dwie tezy:

1. *Projektowanie promieniowego stopnia turbinowego wykorzystującego częściowe zasilanie i zabieg stopniowania prędkości w jednym wieńcu łopatek wirnikowych jest możliwe z wykorzystaniem modelu OD z superpozycją strat przy wsparciu symulacji numerycznych wykorzystujących model 2D, szczególnie do wyznaczenia niestacjonarnych składowych strat częściowego zasilania.*
2. *Mechanizmy powstawania strat częściowego zasilania w stopniu promieniowym wykorzystującym stopniowanie prędkości w jednym wieńcu łopatek wirnikowych częściowo odbiegają od mechanizmów w klasycznym częściowo zasilanym stopniu.*



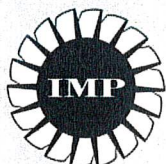
Ponadto przedstawiono układ pracy oraz osadzenie badanego problemu w dziedzinie naukowej i dyscyplinie.

Rozdział 2 „Przegląd literatury” poświęcony jest analizie źródeł literaturowych w kontekście tematyki doktoratu. Po zarysowaniu trendów we współczesnych badaniach turbin, przedstawiono stan wiedzy dotyczący tematyki bezpośrednio związanej z prowadzonymi badaniami. Omówiono potrzebę i istniejące rozwiązania częściowego zasilania oraz zdefiniowano dodatkowe straty występujące w tym przypadku. Przedstawiono również ideę i sposoby realizacji stopniowania prędkości przy użyciu stopnia Curtisa oraz badanego w pracy stopniowania prędkości w jednym stopniu wirnikowym w ujęciu historycznym jak i współczesnych badań turbin typu Elektra.

Rozdział 3 „Obiekt badań – prototypowa turbina 5 kW” przedstawia szereg działań związanych z zaprojektowaniem, testami numerycznymi, budową prototypu turbiny i jej testami ruchowymi. Rozpoczyna się on zaprezentowaniem algorytmu procesu projektowania turbiny będącej obiektem badań a następnie opisem poszczególnych etapów tego procesu. Szczegółowo opisany jest tok obliczeń układu przepływowego z wykorzystaniem modelu OD i zaprezentowane są geometrie dyszy i profilu łopatki wirnikowej oraz kanału nawrotnego. W dalszej części przedstawiono aspekty numerycznego modelowania przepływu trój- i dwuwymiarowego (3D i 2D), służącego do weryfikacji przepływowej projektu. Następnie opisano etap numerycznej analizy wytrzymałościowej i analizy modalnej drgań wirnika turbiny zaprojektowanego stopnia z użyciem metody elementów skończonych. W dalszej kolejności przedstawiony jest konstrukcja prototypu razem z jego rysunkiem złożeniowym oraz rysunkami wykonawczymi wybranych elementów oraz zdjęciami prototypu. Następnie przedstawione są wyniki i obserwacje z testów ruchowych prototypowej turbiny. Rozdział zamyka charakterystyka przepływu dla nominalnego punktu pracy w oparciu o wyniki symulacji 2D.

Rozdział 4 „Badania prototypowej turbiny pod obciążeniem” prezentuje całokształt badań eksperymentalnych wykonanych na opracowanym prototypie turbiny powietrznej. Na jego początku, po wskazaniu celów badań, przedstawione jest aranżacja stanowiska badawczego do badań prototypowej turbiny a następnie omówiona jest metodyka badań. W dalszej kolejności przedstawiono i omówiono wyniki badań opierając się o charakterystyki mocy i sprawności turbiny dla trzech konfiguracji sektorów zasilania oraz szerokiego zakresu zmian ciśnienia zasilania i prędkości obrotowej. Na końcu rozdziału przedstawiano porównanie wyników uzyskanych z eksperymentu oraz z symulacji i wskazano na przyczyny tych różnic.

Rozdział 5 „Model strat częściowego zasilania układu przepływowego ze stopniowaniem prędkości w jednym wieńcu wirnikowym” przedstawia propozycję adaptacji klasycznego modelu superpozycji strat częściowego zasilania dla konfiguracji turbiny analizowanej w tej pracy. Po przedstawieniu klasycznego ujęcia strat wentylacji i sektorowej przy wyznaczeniu mocy wewnętrznej stopnia przedyskutowano mechanizmy strat częściowego zasilania w badanym układzie przepływowym. Badania te oparte zostały na symulacjach przepływu w turbinie dla szeregu konfiguracji warunków jej pracy. Następnie przedstawiona jest adaptacja modelu superpozycji dla turbiny ze stopniowaniem prędkości w jednym wieńcu wirnikowym. Ostatnią część rozdziału stanowi prezentacja zastosowywania metody hybrydowej, bazującej na danych z badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych, do wyznaczenia strat częściowego zasilania.



Rozdział 6 „Wnioski i podsumowanie” prezentuje podsumowanie przeprowadzonych prac, uzyskanych wyników oraz ich analiz w kontekście postawionych w rozprawie dwóch tez. Na koniec zarysowano możliwości dalszych prac.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Realizację pierwszego z postawionych celów pracy, tj. opracowanie hybrydowej metody projektowej częściowo zasilanej turbiny promieniowej ze stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym zaprezentowano w postaci algorytmu przedstawionego na Rys. 3-1. Metoda ta obejmuje szereg następujących po sobie etapów projektowania, z licznymi pętlami kalibracji i weryfikacji poszczególnych aspektów projektu i prototypu.

Rozpoczyna się ona zdefiniowaniem założeń projektowych podsumowanych w Tab. 3-1. Następnie prowadzone są obliczenia z wykorzystaniem teorii OD (termodynamiczne i kinematyki przepływu) z kolejnymi operacjami bardzo czytelnie zgrupowanymi w Tab. 3-2. Pozwala to na przygotowanie wstępnych projektów konstrukcyjnych geometrii kanału dyszy i kanału międzyłopatkowego wirnika oraz projektu kanału nawrotnego. Opisane podejście jest typowe i odpowiednie w projektowaniu maszyn przepływowych. Uzyskana konfiguracja kanałów stanowi punkt wyjścia do kalibracji modelowania OD, z wykorzystaniem stacjonarnego, 3D modelowania numerycznego przepływu CFD w pierwszym stopniu. Aspekty kalibracji zostały w pracy opisane w dość ograniczonym zakresie.

Opracowany projekt układu przepływowego służy do budowy 2D modelu numerycznego pozwalającego na uwzględnienie części strat w przepływie. Analizy stacjonarne przepływu pozwalają zweryfikować, czy straty profilowe są na odpowiednio niskim poziomie. Autor zaznacza również na tym etapie uwzględnienie strat brzegowych, co model 2D nie jest w stanie w sposób bezpośredni wskazać. Rozwiązanie z akceptowalnym poziomem strat pozwala na zaprojektowanie wirnika turbiny i jego analizy wytrzymałościowe. Odpowiednio wytrzymała konstrukcja stanowi obiekt niestacjonarnych symulacji 2D, które służą do weryfikacji przyjętych ustawień kątowych kanału nawrotnego i okna wylotowego i ich ewentualnej korekcji z uwzględnieniem strat w kanale nawrotnym. W algorytmie nie jest czytelne jak uwzględnione są straty sektorowe na wejściu i wyjściu łopatek wirnika z łuku zasilania. Być może weryfikacja poziomu tych strat jest kryterium decyzyjnym zakończenia tego etapu badań. W tym przypadku opis najniższej komórki algorytmu po lewej stronie (o tej samej treści jak jednej z poprzednich) jest błędny. Zaproponowane w tej części algorytmu operacje i użyte narzędzia są odpowiedzeniem do postawionych celów i w sposób efektywny pozwalają na weryfikację oraz znalezienie odpowiednich ustawień wzajemnych elementów projektu. Procedura uwzględnia również, w przypadku niespełnienia kryteriów, powrót do odpowiednich etapów projektowania OD.

W końcowym etapie procesu projektowania opracowany jest konstrukcja całego wyniku i jego analiza modalna a następnie projekt konstrukcyjny całości turbiny. Opcjonalnym elementem tego etapu jest weryfikacja jakości przepływu z użyciem symulacji niestacjonarnych dla 3D modelu z uwzględnieniem przecieku nadbandażowego.

W algorytmie nie ma zaznaczonego etapu testów rozruchowych, które są opisane w części końcowej rozdziału 3. Zasadniczo, działanie to nie jest etapem projektowania, ale stanowi pewien etap weryfikacji konstrukcji.



Doktorant bardzo dobrze zaplanował poszczególne etapy procesu projektowego. Każdy z nich jest uzasadniony i pozwala na uwzględnienie wszystkich istotnych aspektów przepływowych, wytrzymałościowych i konstrukcyjnych. W sposób bardzo klarowny umotywowował użycie poszczególnych metod, ich zalety jak i ograniczenia. Przedstawił również sposoby jak te ograniczenia zniwelować lub zmniejszyć ich wpływ na końcowy projekt. Doktorant w zwięzłej i bardzo czytelnej formie opisał etapy przygotowania i przeprowadzenia symulacji numerycznych, zarówno przepływowych jak i wytrzymałościowych. Sposób zastosowania tych metod i ich opis wskazują na ich dobrą znajomość ich zalet i świadomość ograniczeń. Z kolei przedstawione opisy wyników i ich dyskusja, obrazują umiejętność analizy bardzo złożonych zjawisk. Wymiernym efektem jakości działań jest zbudowany prototyp turbiny będący obiektem badań eksperymentalnych.

Badania eksperymentalne prototypu turbiny powietrznej wykonane przez Doktoranta w Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden pozwoliły na wyznaczenie mocy jak i sprawności turbiny w szerokich zakresach zmian ciśnienia zasilania i prędkości obrotowej, dla wszystkich trzech, dwóch oraz pojedynczego sektora zasilania. Doktorant w sposób bardzo czytelny opisał stanowisko i przebieg eksperymentu. Zastosowana metodyka, protokół badań i analiza niepewności świadczą o wysokim poziomie jego kompetencji w kwestii efektywnego prowadzenia badań eksperymentalnych. Prezentacja wyników eksperymentu w postaci graficznej jest bardzo czytelna a przedstawione obserwacje i wyciągnięte wnioski nie budzą zastrzeżeń.

Doktorant dokonał również porównania wyników eksperymentu z wynikami symulacji 2D dla wybranych zakresów prędkości obrotowej i ciśnienia zasilania oraz z wynikami symulacji 3D dla nominalnego punktu pracy turbiny. Wyznaczył on różnice względne między wynikami i określił ich trendy zmian dla symulacji 2D. Przedstawione wyjaśnienia różnic wynikające z braku możliwości ujęcia części strat występujących w rzeczywisty przepływie podczas jego modelowania 2D są wiarygodne. Przeprowadzenie symulacji 3D dało dodatkową możliwość oszacowania części strat, wynikającej z uproszczenia 2D, co moim zdaniem Doktorant niewystarczająco zasygnalizował. W analizie brak jest szacowania strat pozaobwodowych w postaci przecieków zewnętrznych, brodzenia elementów wirujących i strat mechanicznych łożysk (te były szacowane wcześniej). Byłoby wtedy bardziej jasne, na ile różnica pomiędzy wynikami symulacji 3D i eksperymentu (9,6%) jest efektem tych strat a na ile problemów z modelowaniem skomplikowanych, niestacjonarnych zjawisk przepływowych. Wnioski Doktoranta o przewidywalności strat nieuwzględnionych w symulacjach 2D są uzasadnione i mogą być podstawą do ich relatywnie prostego uwzględnienia w procedurze projektowania, co wskazano w pierwszym celu pracy. Rozumiem intencję autora, jak i kontekst zdania, ale w mojej opinii użycie zwrotu „charakteryzują się dużą dokładnością” w podsumowaniu rozdziału 4 nie jest najszcześniejsze dla różnic sięgających 28%.

W rozdziale 5 Doktorant przeprowadził wnikliwe analizy mechanizmów strat wentylacji i sektorowych w oparciu o wyniki niestacjonarnych symulacji numerycznych 2D. W sposób bardzo czytelny opisał zjawiska i zilustrował je na rysunkach przedstawiających rozkłady prędkości i ciśnienia dla wybranych, reprezentatywnych przykładów. Precyzyjnie wskazał i wyjaśnił różnice w mechanizmach strat pomiędzy rozpatrywaną konfiguracją ze stopniowaniem prędkości w jednym wieńcu turbinowym a stopniem



klasycznym. Doktorant nie wskazał na istotne różnice w przypadku mechanizmu strat wentylacji. Z kolei w prezentowanym przypadku mechanizm strat sektorowych wskazał, że jest on bardziej złożony, co wynika z interakcji pomiędzy oboma stopniami prędkości oraz zmiany kierunku z dośrodkowego na odśrodkowy. Doktorant w analizie tych strat zaobserwował zjawisko nazwane przez niego efektem częściowego odzysku energii. Wskazał, że jego przyczyną jest niższy potencjał energetyczny stopnia drugiego i fakt, że ze względu na małą odległość pomiędzy pierwszym i drugim stopniem energia gazu nie ulega całkowitemu rozproszeniu. Zjawisko jest intensywne w przypadku nominalnych warunków pracy turbiny, podczas gdy dla mniejszego ciśnienia zasilania, efekt jest znacznie niższy a dla niższej prędkości obrotowej wręcz niezauważalny. Zapewne wiąże się to ze złożonym przebiegiem zjawisk falowych i dyssypacji energii w zamkniętych przestrzeniach międzyłopatkowych pomiędzy stopniami prędkości. Byłoby ciekawe w oparciu o przebiegi momentu obrotowego na Rys. 5-5 (lub Rys. 5-8) dokonać bilansu towarzyszącego temu zjawisku w powiązaniu z ujemnym efektem strat sektorowych ekspansji (z minimum dla kąta ok. 55° na Rys. 5-5).

Doktorant zdefiniował i dużo miejsca poświęcił na wnikliwą analizę dodatkowego mechanizmu strat mocy wynikającemu z przecieku międzysektorowego przez szczelinę promieniową. Słusznie wskazuje, że mamy tu do czynienia nie tylko z stratą wynikającą z ubytku strumienia masy przepływającego przez wirnik w pierwszym i drugim stopniu, ale też z negatywną interakcją tego przecieku ze strumieniem czynnika opuszczającym drugi stopień. W Tab. 5-1 Doktorant przedstawia wartości tego przecieku dla wybranych konfiguracji, wskazując na wpływ, przede wszystkim prędkości obrotowej, jak i w mniejszym wymiarze, ciśnienia zasilania turbiny. Dla nominalnych warunków pracy turbiny (prędkość obrotowa 30000 obr/min i ciśnienie zasilania 10 bar) przeciek ten jest bardzo duży i przekracza 30%, co przekłada się na sprawność maszyny. Ciekawe jest na ile na wartość tego przecieku wpływa szerokość szczeliny, a ile wynika z transportu masy czynnika zamkniętego w przestrzeniach międzyłopatkowych.

Należy podkreślić szeroki zakres przeprowadzonych analiz z uwzględnieniem różnic w obrazie strat w przypadku zasilania bądź nie sąsiadujących ze sobą sektorów, jak i zmian zachodzących wraz ze zmianami ciśnienia zasilania oraz prędkości obrotowej wirnika. Przełożyło się to na kompleksowość spostrzeżeń i wyciągniętych wniosków. Przedstawiona argumentacja i zobrazowanie zjawisk na zamieszczonych rysunkach nie budzi istotnych zastrzeżeń.

Adaptując model superpozycji strat częściowego zasilania na potrzeby analizowanej konfiguracji turbiny, Doktorant przypisał efekty częściowego odzysku energii oraz przecieku międzysektorowego do strat sektorowych. Stratę przecieku międzysektorowego powiązał bezpośrednio ze strumieniami masy omijającymi zarówno stopień pierwszy jak i drugi. Jest to podejście pragmatyczne i całkowicie uzasadnione. Na str. 122 Doktorant bazując na swoich badaniach, jak i obserwacji przedstawionych w źródłach [76,77], stawia hipotezę co do wpływu szeregu parametrów (nie tylko ciśnienia zasilania i prędkości unoszenia) na poziom strat. Otwiera to pole do dalszych prac w tej tematyce.

Doktorant zastosował hybrydową metodę wyznaczania strat częściowego zasilania bazującą na wynikach badań eksperymentalnych prototypu jak i modelach numerycznych. Wyznaczył on moc strat wentylacji w oparciu o wyniki badań



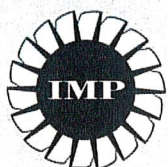
eksperymentalnych. Zaobserwował spodziewany trend wzrostu tej mocy z prędkością obrotową oraz nieoczekiwany wzrost wraz ze spadkiem ciśnienia, dopatrując się możliwego wpływu niezasilanych obszarów przepływowych. Przy wyznaczaniu strat sektorowych, Doktorant oparł się o symulacje przepływu, co jak słusznie argumentował, na drodze badań eksperymentalnych byłoby wręcz niemożliwe. Zbudował dwa zadania trójwymiarowe, niezależnie dla przepływu przez pierwszy i drugi stopień prędkości. Warunki brzegowe oparł na wynikach badań eksperymentalnych, przy czym dla zadania drugiego stopnia warunki wlotowe określone były na podstawie symulacji pierwszego stopnia z pominięciem strat w kanale nawrotnym i odchylen kierunku przepływu od kąta wylotowego kanału nawrotnego. Te i wspomniane przez Doktoranta zjawiska niestacjonarne wprowadzają wspomniany margines błędu, ale są dobrym, kompromisowym podejściem pomiędzy nakładem pracy związanym z prowadzonym modelowaniem a precyzją określenia poziomu strat. Doktorant wykonał badania w bardzo szerokim zakresie ciśnienia zasilania i prędkości obrotowej wirnika dla trzech, dwóch i jednego sektora zasilania. Uzyskany obraz strat sektorowych przedstawił w postaci bezwzględnej jak i względnej odnosząc je do teoretycznej mocy generowanej przez częściowo zasilane oba stopnie. Straty te sięgają 30-45%, wzrastając wraz ze wskaźnikiem prędkości, a dla części ciśnień zasilania, osiągając ekstremum przesuwające się ku mniejszym wskaźnikom prędkości wraz ze spadkiem tego ciśnienia. Wyznaczone wcześniej straty wentylacji przedstawione zostały również w postaci względnej. Doktorant odniósł również wartości całkowitych strat sektorowych do wartości strat wentylacji dla poszczególnych wariantów zasilania we wszystkich analizowanych punktach pracy. Uzyskane wyniki wskazują na dominację strat sektorowych nad stratami wentylacji w zdecydowanej większości badanych punktów pracy.

Adaptacja klasycznego modelu superpozycji strat częściowego zasilania dla turbiny ze stopniowaniem prędkości w jednym wieńcu turbinowym jest podejściem pragmatycznym i jak najbardziej uzasadnionym. Zaproponowana metodyka wyznaczania strat, bardzo dobrze wykorzystuje dostępne dane eksperymentalne i metody numeryczne. Stanowi dobrze wyważony kompromis pomiędzy nakładem prac i jakością uzyskanych wyników. Działania i ich rezultaty przedstawione w rozdziale 5 pozwalają stwierdzić zrealizowanie drugiego i trzeciego celu pracy.

W pierwszej części rozdziału 6 Doktorant podsumował przedstawione wcześniej prace projektowe i badawcze oraz analizy strat w kontekście dwóch tez postawionych w rozprawie. Moim zdaniem zaprezentowana argumentacja nie budzi wątpliwości, że obydwie te tezy zostały udowodnione. W pozostałej części przedstawione są wnioski i podsumowania dotyczące strat wentylacji i sektorowych oraz ich stosunków w różnych warunkach pracy oraz wskazane są pola dalszych prac. Zarysowują one możliwość dalszego poszerzenia wiedzy o mechanizmach strat oraz dalszej generalizacji i uszczegółowienia zaproponowanego modelu strat.

5. Uwagi krytyczne, pytania merytoryczne oraz dyskusyjne

Mam świadomość, że bogaty zakres prac zrealizowanych przez Doktoranta musiał być opisany w ograniczonej co do ilości stron dysertacji. W związku z tym Doktorant stanął przed problemem zwięzłego przedstawienia, co najmniej kluczowych aspektów pracy. Moim zdaniem dobrze podołał temu wyzwaniu, ale oczywiście część bardziej skrótowo



potraktowanych zagadnień daje recenzentowi pole do zadania szeregu dodatkowych pytań i prośb o udzielenie dodatkowych informacji. Te z nich, które uznałem za najbardziej istotne i warte dodatkowego omówienia zaznaczyłem poniżej.

1. Wyznaczenie geometrii dyszy Rys. 3-6, jak i wirnika Rys 3-7 nie są sprawami trywialnymi i warto by poświęcić w pracy na niej trochę miejsca. Jest to moim zdaniem spore osiągnięcie. Proszę o ich krótki opis.
2. Na ile procedura kalibracji modelu OD w oparciu o symulacje 3D była zautomatyzowana i na ile kluczowa jest wiedza ekspercka, w tym przypadku Doktoranta? Dotyczy to również korygowania profilu łopatki wirnikowej.
3. Wg algorytmu przedstawionego na Rys. 3-1 stacjonarne symulacje 2D posłużyły do weryfikacji poziomu zarówno strat profilowych jak i brzegowych. W jaki sposób te drugie były określane?
4. W pracy bardzo mało miejsca poświęcone jest przepływowi w kanale nawrotnym. Wyznaczenie jego kształtu jest czytelnie przedstawione, ale poza ogólnymi stwierdzeniami brak jest opisu jak bardzo przepływ w tym kanale odbiegał od założeń. Na kilku rysunkach w rozdziale 5 widać jest wysoki poziom skomplikowania struktury przepływu. Proszę o krótkie scharakteryzowanie przepływu i korelację uzyskanych wyników z założeniami.
5. Jakiego rzędu schemat dyskretyzacji przestrzennej zastosowano i jakie poziomy zbieżności numerycznych uzyskiwano dla symulacji stacjonarnych i niestacjonarnych?
6. Proszę o doprecyzowanie co znaczy zwrot „zwalidowany (w dostępnej literaturze) model obliczeniowy” na str. 124.

Praca jest czytelnie i starannie napisana, przy czym biorąc pod uwagę jej objętość, Autor nie ustrzegł się szeregu drobnych błędów lub nieścisłości:

- W Tab. 3-1 B_w oznacza długość promieniową zamiast osiowej;
- W Tab. 3-2 występują błędy w indeksach parametrów we wzorach 3.22, 3.30, 3.49 jak i formatowaniu indeksów we wzorach 3.16, 3.28, 3.40 oraz drobne różnice w oznaczeniach na Rys. 3-2 i w Tab. 3-2 (straty wylotowe);
- Inne drobne defekty to: brak spacji przed jednostkami w kilku (np. str. 48); brak % na Rys. 3.14; wskazanie wartości 28% zamiast 32% (str. 134);
- Doktorant wielokrotnie odnosi się do analiz bazujących na symulacjach jako do „badań analitycznych” (np. str. 110), podczas gdy były to badania numeryczne;
- Doktorant używa wielokrotnie (szczególnie we wnioskach) słowa „fenomen”. Czy nie bardziej oczywistym byłoby słowo zjawisko?
- W pracy znalazłem również nieliczne literówki: brak „z” w pierwszym zdaniu (str. 75); „pływ” zamiast wpływ (str. 109); „wlocie” zamiast wylocie (str. 126).

Mam jeszcze uwagi techniczne co do dysertacji. Przy opisie tak skomplikowanych zagadnień ich ilustracje na rysunkach powinny znajdować się jak najbliżej. W kilku przypadkach (Rys. 5-6, 5-10, 5-12) rysunki znajdowały się dwie strony dalej od miejsca odniesienia się do nich. Wprowadzony wcześniej układ osi na rysunkach (np. Rys. 5-20)



został zmieniony na kolejnych (Rys. 5-21, 5-22, 5-23) a potem kierunki wartości ponownie zmienione na Rys. 5-28, 5-23, 5-30. Zakres skali dla Rys. 4-18, Rys. 5-20 został kiepsko dobrany.

Wskazane powyżej drobne błędy w żaden sposób nie zmniejszają czytelności i odbioru pracy i nie wpływają na jej wysoką ocenę merytoryczną

6. Ocena rozprawy i wniosek końcowy

Oceniając całość rozprawy uważam, że mgr inż. Dawid Zaniewski wykazał się dobrą ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, pozwalającą mu na opracowanie złożonego algorytmu projektowania turbiny, jak również dogłębną analizę skomplikowanych zjawisk przepływowych. Rozwiązując postawione problemy badawcze Doktorant posłużył się poprawną i szeroką metodyką badań naukowych obejmującą aspekty analityczne, numeryczne oraz doświadczalne i wykazał umiejętność samodzielnego ich prowadzenia. Uzyskane wyniki badań i wnioski sformułowane na podstawie ich szerokich analiz pozwalają mi uznać rozwiązanie problemu naukowego za oryginalne i wzbogacające istniejącą wiedzę. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne i aspekty dyskusyjne nie umniejszają wartości pracy.

Biorąc pod uwagę wartość naukową, poznawczą i aplikacyjną rozprawy stwierdzam, że przedstawiona od oceny rozprawa doktorska „Badania układu przepływowego turbiny z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym”, spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. 2023 poz. 742 ze zm.). Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy Pana mgr. inż. Dawida Zaniewskiego do publicznej obrony.

