

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Dawida Zaniewskiego pod tytułem „Badania układu przepływowego turbiny z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym”

Opinia została przygotowana na zlecenie Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku zawarte w piśmie RN-421-2/24 z dnia 19.11.2024r. w oparciu o umowę o dzieło nr 19.11/D/1 z dnia 19.11.2024r.

Charakterystyka pracy

Recenzowana praca zawiera 153 strony tekstu podzielonego na 6 rozdziałów, spis oznaczeń i bibliografię. Bibliografia obejmuje 91 pozycji.

Praca doktorska mgr inż. Dawida Zaniewskiego „Badania układu przepływowego turbiny z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym” prezentuje wyniki i wnioski z badań numerycznych i eksperymentalnych przepływu przez turbinę, w której wykorzystano koncepcję częściowego zasilania oraz dwa stopnie prędkości w jednym wieńcu wirnikowym.

Rozdział pierwszy zawiera krótkie przedstawienie motywacji podjęcia tematu. Doktorant sformułował trzy cele swej pracy. Pierwszy to opracowanie nowoczesnej i utylitarnej z inżynierskiego punktu widzenia metody projektowania częściowo zasilanych promieniowych stopni turbinowych z zabiegiem stopniowania prędkości w jednym wieńcu wirnikowym. Drugim celem był opis mechanizmu strat częściowego zasilania w nietypowym promieniowym układzie przepływowym turbiny, w którym kierunek przepływu przez wieniec łopatek wirnikowych jest periodycznie odwracany w poszczególnych sektorach. Trzecim celem było wyznaczenie strat częściowego zasilania dla badanej nietypowej geometrii stopnia turbinowego, w którym występuje stopniowanie prędkości realizowane na jednym wieńcu łopatkowym w przepływie dośrodkowo-odśrodkowym.

Oprócz wymienionych celów, Doktorant sformułował, zgodnie z przyjętym zwyczajem prac doktorskich, następujące dwie tezy pracy:

- Projektowanie promieniowego stopnia turbinowego wykorzystującego częściowe zasilanie i zabieg stopniowania prędkości w jednym wieńcu łopatek wirnikowych jest możliwe z wykorzystaniem modelu 0D z superpozycją strat przy wsparciu symulacji

numerycznych wykorzystujących model 2D, szczególnie do wyznaczenia niestacjonarnych składowych strat częściowego zasilania.

- 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.

Autor przedstawił uzasadnienie klasyfikacji zagadnień rozpatrywanych w pracy doktorskiej do dziedziny nauk inżynierjno-technicznych i dyscypliny inżynieria mechaniczna oraz wskazał metody badawcze zastosowane w prowadzonych badaniach.

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury. Przedstawiono w nim generalną tematykę prowadzonych badań przepływowych turbin. Szczególną uwagę poświęcono nietypowym rozwiązaniom układów przepływowych, zbliżonym do tych, jakie analizowano w pracy doktorskiej. Przybliżono teorię stopnia częściowo zasilanego oraz zasadę stopniowania prędkości zarówno w układzie wielowieńcowym jak i w układzie jednowieńcowym, takim jaki był przedmiotem badań. Przedstawiono rys historyczny rozwiązań ze stopniowaniem prędkości w jednym wieńcu oraz krótko scharakteryzowano współczesne badania takiego rozwiązania prowadzone na Politechnice Łódzkiej oraz w Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden w Niemczech.

W rozdziale trzecim opisano obiekt badań, prototypową turbinę o mocy 5kW. W sposób szczegółowy przedstawiono proces projektowania turbiny w którym do wyznaczenia geometrii układu przepływowego wykorzystano algorytm 0D modele 2D i 3D przepływu. Opisano szczegółowo poszczególne kroki algorytmu 0D i przedstawiono geometrię kanału dyszowego oraz kanału wirnikowego. Uzupełnieniem informacji o geometrii turbiny jest prezentacja metody optymalizacji kanału nawrotnego. Uzyskane wyniki obliczeń geometrii z wykorzystaniem algorytmu 0D zostały zweryfikowane za pomocą symulacji numerycznych 2D przy wsparciu w wydzielonych obszarach modelem 3D. W modelu 3D uwzględniono przeciek nadłopatkowy. Obliczenia przepływowe zostały rozszerzone o analizy wytrzymałościową i drgań. W kolejnych punktach rozdziału zaprezentowano konstrukcję turbiny oraz testy ruchowe prototypowej turbiny. Rozdział kończy opis przepływu przez turbinę na podstawie symulacji 2D wykonanej w nominalnym punkcie pracy.

Rozdział czwarty poświęcono omówieniu badań eksperymentalnych prototypu turbiny. Rozdział rozpoczyna się opisem stanowiska na którym prowadzono badania w Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden. Następnie podano zakres przeprowadzonych badań, które obejmowały trzy konfiguracje sposobu zasilania oraz metodę ich prowadzenia. W kolejnym punkcie rozdziału zilustrowano przebieg zmian podstawowych parametrów pracy turbiny w czasie pomiarów. Opisano charakterystyki mocy oraz sprawności w funkcji prędkości obrotowej i charakterystykę sprawności w funkcji prędkości obrotowej dla różnych sposobów zasilania.

W rozdziale piątym zawiera teorię strat częściowego zasilania wraz z modelem oraz opisem mechanizmów jego powstawania. Zaproponowano adaptację tego modelu do analizowanej konfiguracji turbiny. Przedstawiono autorską metodę hybrydową wyznaczania strat częściowego w oparciu o wyniki pomiarów oraz analizy numeryczne modelem 3D.

Część opisową pracy kończy rozdział szósty w którym znajdują się wnioski oraz podsumowanie.

Uwagi ogólne

Badania, które Doktorant prowadził i opisał są badaniami numerycznymi i eksperymentalnymi i dotyczą zjawisk zachodzących w czasie ekspansji w układach łopatkowych maszyny przepływowej, czyli zagadnień z obszaru mechaniki płynów. Analizowane przypadki przepływu odpowiadają problematyce, jaka rozwiązywana jest w procesach konstruowania i analizy turbin. Ten zakres tematyczny mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Uzasadnienie klasyfikacji tematyki pracy do dyscypliny inżynierii mechanicznej, przedstawione szczegółowo przez Doktoranta w pracy, nie budzi żadnych wątpliwości.

Praca doktorska mgr. Dawida Zaniewskiego dobrze wpisuje się w aktualne trendy poszukiwania wysokosprawnych procesów energetycznych mogących wykorzystywać ciepło odpadowe pracujących na różnych czynnikach roboczych. Tej tematyce poświęcona jest obecnie dość duża liczba publikacji naukowych. Autor zawarł w rozdziale drugim odniesienia do dość dużej liczby źródeł, zarówno fundamentalnych z okresu XX wieku jak i współczesnych, poświęconych badaniom przepływu w turbinach cieplnych, zarówno metodami eksperymentalnymi, jak i numerycznymi. Należy podkreślić, że rozwiązania nietypowe oparte o stopniowanie prędkości w jednym wieńcu wirnikowym były rzadko stosowane i w związku z tym ta tematyka nie jest szerzej obecna we współczesnej literaturze. Jako zaletę pracy należy uznać podjęcie tego tematu i zbadanie zagadnień przepływu za pomocą nowoczesnych narzędzi badawczych.

Rozpatrywana turbina ma trzy sektory zasilania, które mogą pracować niezależnie. Badania eksperymentalne prowadzono na stanowisku badawczym w Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden. We wszystkich badaniach czynnikiem zasilającym turbinę było powietrze.

Na podkreślenie zasługuje to, że w pracy przedstawiono pełen algorytm projektowania podstawowych parametrów geometrycznych turbiny, który oprócz obliczeń przepływowych zawiera również analizę wytrzymałościową oraz analizę drgań. Obliczenia są uzupełnione badaniami eksperymentalnymi. Takie kompleksowe ujęcie jest bardzo wartościowe z punktu widzenia naukowego i użytecznego, gdyż pozwala wyciągać wiarygodne wartościowe wnioski o przebiegu ekspansji w turbinie.

Opisana procedura projektowania składa się z algorytmu OD, informacji o geometrii kanału kierowniczego (rys.3.6), metody iterowania profilu wirnikowego oraz optymalizacji kanału nawrotnego. W tej części pracy brakuje szeregu ważnych informacji. Przyjętego profilu dyszy nie można wyznaczyć za pomocą algorytmu OD. Autor nie podał skąd on wynika. Podobnie z profilem wirnikowym. Sposób wyznaczenia tego profilu został przedstawiony w jednym zdaniu. Nie wiadomo też, jak dobrano szerokość wieńca. Z treści pracy nie wynika, a powinno to być zaznaczone, czy wyznaczenie geometrii profili było prowadzone przez Autora, czy przedstawia on tylko informacje z innych badań.

Kanał nawrotny został dobrany w procesie optymalizacji w której funkcją celu była minimalizacja sumarycznej wartości krzywizny wzdłuż całej linii środkowej kanału. Wydaje się, że brakuje tu warunku ograniczającego maksymalną krzywiznę. Kształt w

strefie środkowej w której następuje nawrót wydaje się mieć zbyt dużą krzywiznę. Wskazuje na to również kontur prędkości wyznaczony w obliczeniach numerycznych, w którym można zauważyć lokalne oderwania (rys.5.1, 5.3, 5.4).

W opisie brak jest dyskusji szerokości kanału nawrotnego za pierwszym stopniem oraz przed i za drugim stopniem. Zasilanie wirnika w pierwszym stopniu jest na 2 podziałkach wirnika a wylot na 3 podziałkach, natomiast w drugim stopniu odpowiednio na 5 i 6 podziałkach. Wydaje się, że w drugim stopniu szerokie łuki zasilania i różnice w podziałkach powodują zróżnicowanie kąta napływu na wirnik (dwa kanały z pięciu mają w pełni rozwinięty przepływ. Ten problem wydaje się bardzo istotny również w kontekście pracy: Streit, P.; Weiß, A.P.; Stümpfl, D.; Špale, J.; Anderson, L.B.; Novotný, V.; Kolovratník, M. Concept and Design of a Velocity Compounded Radial Four-Fold Re-Entry Turbine for Organic Rankine Cycle (ORC) Applications. *Energies* 2024, 17, 1185. <https://doi.org/10.3390/en17051185>, w której istotną poprawę sprawności uzyskano zmniejszając szerokość kanałów dolotowych i wylotowych. Czy brano to pod uwagę w prototypowej konstrukcji?

Doktorant przedstawił model przestrzenny przepływu przez poszczególne stopnie turbiny, który uwzględnił szczelinę osiową i przeciek przez tę szczelinę. Skoro stosowano taki model to zabrakło w tekście informacji o wielkości tej szczeliny oraz o stratach przecieku. Nie wiadomo też, jaka jest geometria uszczelnienia i jak ją dobierano.

W pracy wskazano, że konieczne było prowadzenie obliczeń niestacjonarnych. Nie podano jednak jak zmieniały się parametry w takich obliczeniach np. jak zmieniało się ciśnienie za dyszą, czy kąty.

Doktorant zaznaczył, że: „model 2D służył do korygowania geometrii układu przepływowego ze względu na wystąpienie zjawisk niestacjonarnych. Omówienie otrzymanych obrazów przepływu w docelowej geometrii układu przepływowego będących rezultatem analiz w oparciu o ten model przedstawiono w podrozdziale (3.2)”. Szkoda, że nie ma informacji o wielkości tej korekty, jakich wielkości dotyczyła i jaka była poprawa.

Opis na stronach 54-55 dotyczy porównania modelu 2D z modelem 3D oraz 0D. To porównanie dotyczy podstawowych parametrów przedstawionych w Tabeli 3.3. W porównaniu brakuje informacji o parametrach kinematycznych, czy o wartościach ciśnienia w charakterystycznych punktach procesu ekspansji. Nie wiadomo dlaczego, jak podał Autor, nie wprowadzono do modelu 0D strat częściowego zasilania. Byłoby interesujące, gdyby w modelu 0D podjęto próbę uwzględnienia wszystkich strat bo przecież zadanie oszacowania strat było ważnym elementem całej pracy.

Generalną uwagą jest brak informacji o dyskretyzacji poszczególnych części układu przepływowego. Podana jest tylko globalna ilość elementów siatki i informacja o wartości y^+ . Trudno się zorientować jak była zagęszczana siatka do badania niezależności rozwiązania. Ze względu na znaczne różnice w poziomie gradientów parametrów między poszczególnymi strefami domeny obliczeniowej to zagęszczanie powinno być nierównomierne. Pewne wątpliwości budzi wybór siatki z analizy niezależności rozwiązania od siatki który ujęto na rys.3.14. Wydaje się, że na wykresie punkty dla siatki 0.7M są zaznaczone dla mniejszej ilości węzłów. Nie jest jasne dlaczego siatka 07M daje wyniki odbiegające od tendencji wynikającej z innych siatek. Budowanie linii trendu w

oparciu o taki zestaw wyników nie jest precyzyjne. Jak można tę rozbieżność uzasadnić? W tego typu analizie dodatkowo linia trendu powinna przechodzić przez punkt uzyskany dla najgęstszej siatki, bo to jest punkt odniesienia.

Doktorant zaproponował zastosowanie autorskiej metody hybrydowej wyznaczania strat częściowego zasilania. Zaadoptował model superpozycji strat częściowego zasilania. W modelu wykorzystał dane eksperymentalne oraz rozdzielone modele numeryczne dla stopni prędkości. W modelach numerycznych zastosował warunki brzegowe z eksperymentu.

Wyniki eksperymentu w postaci charakterystyk mocy i sprawności potwierdziły skuteczność zastosowania opisanej metody projektowej. Otrzymane różnice w wartościach parametrów pracy względem stosowanych modeli były na poziomie 10-30 procent, co dla takiego przypadku można zaakceptować. W opisie wyników eksperymentu i w porównaniu danych eksperymentalnych z obliczeniami wyraźnie brakuje zestawienia zmian ciśnienia w charakterystycznych punktach turbiny. Wydaje się, że ten parametr, choć mierzony, nie został w pracy w pełni wykorzystany.

Treść rozprawy mimo pewnych uwag oraz punktów wymagających doprecyzowania jest bardzo interesująca i wartościowa. Wnosi ona szereg nowych elementów naukowych w teorię maszyn przepływowych, szczególnie dotyczących opisu zjawisk przy częściowym zasilaniu i wyjaśnienia procesu generowania mocy, a co się z tym wiąże wielkości obciążenia poszczególnych łopatek w czasie obrotu. Autor szczegółowo wyjaśnia mechanizm strat częściowego zasilania i identyfikuje zjawisko odzysku energii, podkreślając występujące różnice z modelem klasycznym.

W trakcie czytania pracy pojawia się wiele wątków i pytań. Wydaje się to zrozumiałe, gdyż zagadnienia związane z projektowaniem części przepływowej turbiny o tak nietypowej konstrukcji są złożone, a Doktorant mógł zająć się bardziej szczegółowo tylko niektórymi.

Język rozprawy jest poprawny, Autor sprawnie posługuje się nomenklaturą z zakresu mechaniki płynów, maszyn przepływowych, numerycznej mechaniki płynów oraz wytrzymałości materiałów. Prezentowane rysunki i schematy są staranne i dobrane we właściwy sposób do treści opisów. Układ pracy w swej strukturze jest poprawny, jednak w niektórych fragmentach przydałby się dodatkowo schemat postępowania. Szczególnie dotyczy to metody hybrydowej, która opisana jest ciągłym tekstem na kilkunastu stronach. Literatura, jaką wykorzystano w pracy, jest obszerna i obejmuje zarówno fundamentalne jak i aktualne pozycje.

Mgr Dawid Zaniewski zastosował w swojej pracy nowoczesne narzędzia obliczeniowe oraz zaplanował i przeprowadził kompleksowe badania eksperymentalne. Koncepcję badań oraz plan badań prawidłowo dopasowano do wyznaczonego celu. Poziom merytoryczny pracy oraz uzyskane wyniki z ich analizą i interpretacją oceniam jako spełniające wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Uwagi szczegółowe

W czasie czytania pracy pojawiło się kilka wątpliwości, które wymagałyby wyjaśnienia oraz zauważyłem kilka miejsc, które wymagałyby korekty:

Rys.3.14 – Nie umieszczono jednostki na osi.

Str.51, ostatni akapit – Czy właściwa jest interpretacja opisu, że w procesie obliczeń 0D kąty napływu/wypływu są korygowane i proces optymalizacji kanału nawrotnego oraz dobór profili jest powtarzany?

Str.58, linia 1 -Jak należy rozumieć stwierdzenie „Ekstremum naprężeń wynikające ze sposobu dyskretyzacji modelu zostało pominięte”.

Jak w z obliczeń numerycznych wyznaczano moc turbiny?

Czy możliwe było porównanie ciśnienia za dyszą z obliczeń 2D i z eksperymentu?

Str.102 – Użyteczność modelu 3D w projektowaniu może być mała, ale podobnie jak eksperyment można ją zastosować dla oceny innych warunków pracy w celu wyznaczenia charakterystyk. To z pewnością jest bardzo cenne narzędzie.

Dlaczego nie uwzględniono strat wentylacji w algorytmie 0D?

Rys.5.13 – Autor nie odniósł się do tego, że dla nominalnych wartości (10bar, 30000min⁻¹) straty wentylacji są dwa razy mniejsze niż dla sąsiednich ciśnień (11 i 9bar). Widać to też na rys. 5.25. Czy jest jakieś uzasadnienie tego faktu? Czy wynika to z tego, że w warunkach obliczeniowych minimalizują te straty?

Rys 5.15-5.17 – Na rysunkach podano moce poszczególnych stopni. Dodatkowej informacji dostarczyłaby moc sumaryczna, mimo oddzielnych modeli.

Tab.5.1. przedstawia straty przecieku międzysektorowego, które sięgają 30% strumienia głównego. Czy rozważano uszczelnienie międzysektorowe np. typu honeycomb? To mogłoby mieć wpływ na strukturę przepływów w obszarze niezasilanym.

Str. 134 – Jeżeli odrzuci się przypadek 5bar, tak jak pisze Autor, to straty sektorowe mieszczą się w przedziale 32-43% a nie 28-43%. Czy w modelach 0D należałoby rozdzielać te straty na I i II stopień prędkości, aby skorygować .

Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że temat podjęty przez mgr inż. Dawida Zaniewskiego jest tematem aktualnym i ważnym z punktu widzenia wiedzy o zjawiskach w nowych konstrukcjach turbin małej mocy. Doktorant przedstawił rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego oraz wykazał się wiedzą teoretyczną w zakresie zjawisk przepływowych w układach łopatkowych maszyn przepływowych oraz konstrukcji turbin. Przeprowadzone analizy z wykorzystaniem złożonych modeli obliczeniowych oraz przygotowanie i realizacja eksperymentów pozwoliły na osiągnięcie zamierzonych celów i potwierdzają kompetencje Doktoranta do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do opinii praca doktorska mgr inż. Dawida Zaniewskiego spełnia wymagania ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023 poz. 742 ze zm.) i może stanowić podstawę do przeprowadzenia postępowania o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

