

Recenzja pracy doktorskiej

mgra inż. Rafała Muchowskiego

pt.: „Design and optimization of an axial compressor with use of Multi-Fidelity approach”

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej oraz pisma, nr RM-530-28-03/2023 z dnia 22.11.2023, przesłanego przez Pana dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta prof. PRZ, Przewodniczącego Rady Dyscypliny.

1. Wstęp

Praca doktorska Pana mgra inż. Rafała Muchowskiego została wykonana w ramach programu doktorat wdrożeniowy we współpracy z MTU Aero Engines Polska. Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. Andrzej Majka, prof. Politechniki Rzeszowskiej, a promotorem pomocniczym Pan mgr inż. Wojciech Bar.

Rozwój transportu lotniczego i potrzeba poszukiwania nowych rozwiązań celem poprawy sprawności napędów lotniczych oraz redukcji zanieczyszczeń atmosfery jest motywacją podjętych badań prezentowanych w pracy doktorskiej. Pamiętając o celach strategicznych, jakie dla lotnictwa wyznacza ACARE (Advisory Council for Aviation Research in Europe) w dokumencie „Flight Path 2050 Europe’s Vision for Aviation” oraz obecne wymagania dotyczące redukcji emisji dwutlenku węgla, dwutlenku siarki, tlenków azotu i sadzy, czy smug kondensacyjnych, poprawa sprawności całego napędu lotniczego ma szczególne znaczenie. Udział transportu lotniczego na rynku globalnym jest znaczący, co potwierdza duże znaczenie badań nad rozwojem technologii lotniczych.

Jednym z elementów silnika lotniczych, od którego zależy nie tylko sprawność napędu, ale także stabilność pracy całego układu, jest sprężarka. Wobec rozwijanych koncepcji i nowych konstrukcji silników lotniczych układ sprężania musi sprostać wymaganiom dotyczącym redukcji masy całego silnika przy jednoczesnej poprawie sprawności procesu.

Istotnym zagadnieniem, z jakim należy się zmierzyć w trakcie projektowania układu jest duży zakres zmienności liczb Reynoldsa i Macha w kanałach łopatkowych w różnych warunkach pracy i fazach lotu oraz niestacjonarności przepływu będące efektem silnie trójwymiarowego przepływu całym układzie. Zakres zmienności parametrów w obszarze przepływu i ich niestacjonarność zasadniczo wpływa na trudności modelowania i konieczność stosowania modeli lub metod uproszczonych, jeśli one mają być efektywnie wykorzystane w procesie projektowania sprężarki.

2. Charakterystyka pracy i uwagi ogólne

Praca doktorska Pana mgra inż. Rafała Muchowskiego została zredagowana na 143 stronach i jest napisana w języku angielskim. Materiał diskutowany w pracy ujęto w 7 rozdziałach. Pierwszy rozdział poprzedzony jest spisem symboli, rysunków i tabel, natomiast spis literatury (61 pozycji), jest zamieszczony w ostatnim rozdziale.

W pierwszym rozdziale Doktorant krótko przedstawia znaczenie problemów projektowania sprężarek w zastosowaniu do silników lotniczych. Natomiast w drugim rozdziale zostały scharakteryzowane metody modelowania przepływu w maszynach wirnikowych, wybrane metody optymalizacji lub wykorzystywane w projektowaniu układów łopatkowych. Metody te głównie bazują na łączeniu modeli przepływu dwu- i trójwymiarowego, a z kolei modele trójwymiarowe mogą charakteryzować się różnym stopniem złożoności. Podsumowując tę część pracy Doktorant stwierdza, że stan wiedzy na temat wrażliwości modeli obliczeniowych o niższej i wyższej dokładności dla sprężarek osiowych jest ubogi. Ponadto, zastosowanie tych modeli do optymalizacji sprężarek w stanach granicznych (granica pracy statecznej) jest mocno ograniczone.

Wobec powyższego zostały zdefiniowane dwa cele pracy:

- wyznaczenie ograniczeń w przewidywaniu sprawności przy wykorzystaniu modeli o różnym stopniu złożoności dla szerokiego zakresu warunków eksploatacyjnych,
- opracowanie koncepcji „Multi-Fidelity” w celu eksploracji przestrzeni projektowej dla szerokiego zakresu pracy sprężarki i możliwości przewidywania sprawności i granicy pracy statecznej sprężarki osiowej.

Wobec powyższego można stwierdzić, że wybrana tematyka ma istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne oraz spełnia kryteria prac w ramach dyscypliny „inżynieria mechaniczna”.

W swojej pracy Doktorant wykorzystuje dwie metody obliczeniowe. Metoda krzywizny linii prądu (Streamline Curvature Method) oparta na modelu dwuwymiarowym, określana w pracy jako Low-Fidelity oraz metoda oparta na modelu trójwymiarowym z wykorzystaniem modeli turbulencji, określana jako Hi-Fidelity. Obie metody oraz analiza ich wrażliwości na wybrane parametry zastosowanych modeli zostały przedstawione w rozdziale czwartym. Do analizy przepływu i efektywności modeli obliczeniowych została wykorzystana geometria 8-stopniowej sprężarki zainstalowanej na stanowisku badawczym MTU Aero Engines AG, w której trzy pierwsze palisady kierownicze są regulowane i umożliwiają zmianę kąta napływu dla różnych warunków pracy.

Obliczenia przepływu trójwymiarowego zostały wykonane programem TRACE (Turbomachinery Research Aerodynamics Computational Environment), który jest rozwijany przez DLR Institute of Propulsion Technology we współpracy z MTU Aero Engines AG. Interakcja palisad stacjonarnych i wirnikowych modelowana jest przy wykorzystaniu metody Mixing Plane. Ta metoda jest popularnie wykorzystywaną w analizie układów wielostopniowych w ramach obliczeń przepływu stacjonarnego ze względu na relatywnie niski koszt obliczeń. Należy jednak podkreślić, że istnieje szereg modyfikacji mixing plane, a w pracy zabrakło krótkiego opisu wykorzystanej metody. Ten element modelu obliczeniowego jest bardzo istotny ze względu na uśrednienia parametrów przepływu w płaszczyźnie pomiędzy palisadami, co ogranicza informację o nierównomierności przepływu w sąsiednich palisadach, zarówno w górę jak i w dół przepływu, a w konsekwencji na przewidywane charakterystyki sprężarki.

W pierwszej fazie analizy wrażliwości modelu 3D, Doktorant przedstawił wpływ siatki obliczeniowej i modelu turbulencji. Niestety nie jest jasne jak różnią się poszczególne siatki, tzn. jak różni się zagęszczenie w kierunku normalnym do ściany, wzdłuż profilu oraz w kierunku wysokości kanału. Całkowita ilość elementów siatki obliczeniowej umożliwia porównanie nakładów obliczeniowych, ale nie jest wystarczająca do oceny wpływu na przewidywane struktury przepływu. W przypadku modelowania przepływu 3D należy podać warunki brzegowe. Zabrakło szczegółowej informacji na ten temat, nie podano także jakie warunki brzegowe zastosowano dla modelu turbulencji oraz czy na wylocie zadane ciśnienie statyczne jest wartością stałą, średnią, czy zastosowano warunek równowagi promieniowej. Nie wiadomo jaka jest liczba Reynoldsa i liczba Macha. Brakuje także informacji o wykorzystanych schematach numerycznych, co jest standardem w pracach prezentujących wyniki analiz numerycznych, oraz informacji o kryteriach zbieżności procesu obliczeniowego. To jest szczególnie ważne w przypadku modelowania przypadków w skrajnych punktach charakterystyki.

Na rys. 4.4 – 4.6 zostały porównane charakterystyki sprężarki wyznaczone dla trzech prędkości obrotowych i dwóch modeli turbulencji, $k-\omega$ i SST z danymi eksperymentalnymi. Obliczenia układu 8-stopniowej sprężarki są zagadnieniem złożonym i uzyskane różnice nie są zaskakujące, ale zabrakło szerszej dyskusji jakie mogą być przyczyny uzyskanych różnic. Doktorant stwierdza, że przyczyną może być „discrepancy in boundary layer blockage estimation”. Niestety nie ma wyjaśnienia skąd taki wniosek. Wobec braku informacji o przyjętych kryteriach zbieżności rozwiązania nasuwa się pytanie czy różnice mogą wynikać z ograniczonej dokładności wyznaczonego masowego natężenia przepływu w poszczególnych płaszczyznach między palisadami (mixing-plan) pomimo globalnej zbieżności pomiędzy wlotem i wylotem.

Do porównania wpływu siatki obliczeniowej został wykorzystany model $k-\omega$. Na podstawie tej analizy została wybrana rozdzielczość siatki wykorzystana w dalszej części pracy.

Kolejna część rozdziału 4 zawiera wyniki pracy magisterskiej, której Doktorant był opiekunem. Pod opieką Doktoranta student Wojciech Tulik wykonał obliczenia dla szeregu konfiguracji różniących się złożonością układu przepływowego, a w szczególności wpływem kanałów pozałopatkowych. Przedstawione porównania umożliwiają ocenę czasochłonności obliczeń oraz różnic w przewidywaniu granicy pracy statecznej sprężarki. Tą analizę Doktorant podsumowuje stwierdzeniem, że mniejszy wpływ na dokładność przewidywanych charakterystyk ma mniejsza rozdzielczość siatki obliczeniowej niż uproszczenia układu modelowanego układu przepływowego.

Drugą metodą, stanowiącą istotny element przedstawionej pracy, jest metoda Streamline Curvature Method, sformułowana w ramach modelu dwuwymiarowego osiowosymetrycznego. W pracy nie ma opisu zastosowanego modelu, a Doktorant ogranicza się do zacytowania czterech prac. Warto podkreślić, że tak jak każdy model niższego rzędu wymaga on wprowadzenia informacji w postaci współczynników lub funkcji np. o modelowanych efektach lepkościowych. Ogólne sformułowanie metody SCM wywodzi się z prac Wu oraz późniejszych modyfikacji proponowanych przez różnych autorów, a to oznacza różnice stosowanych implementacji. Cechy stosowanego modelu są szczególnie istotne, gdyż w pracy prezentowane są wyniki dla punktów pracy daleko oddalonych od pracy nominalnej. Rozdział 4 zawiera wyniki obliczeń dla różnych konfiguracji, a także porównanie z wynikami obliczeń 3D. Ta część pracy zawiera interesujące wyniki, ale niestety wyjaśniane dość enigmatycznie, np. na str. 72 w analizie wykresu 4.21 pojawia się fragment „*In all three cases, characteristics are steeper and not showing boundary layer increase towards stability limit as was expected – blockage of SCM model was fitted to WL operational point.*” Interesujący wniosek, ale wobec braku dodatkowych informacji trudny w interpretacji.

Wartościowe porównanie modelu 3D i 2D zamieszczono w rozdziale 4.3, gdzie pokazano różnice wyznaczonej sprawności sprężarki. Widoczne są różnice dla różnych prędkości obrotowych oraz różnych kątów palisad kierowniczych. W ramach analizy przedstawionych różnic i interpretacji wyników warto byłoby przyrzeć się różnicom w poszczególnych stopniach czy palisadach, co umożliwiłoby wnioskowanie o przyczynach różnic całego dla układu przepływowego.

Modele przedstawione w rozdziale 4 są elementami metody Multi-Fidelity, która została zaprezentowana w rozdziale 5 i może być wykorzystana w procesie optymalizacji układu łopatkowego. Doktorant omawia zaproponowaną koncepcję Multi-Fidelity i podkreśla, że w odróżnieniu od dostępnych wyników w literaturze, gdzie przedstawiono wyniki dla przypadków zbliżonych do nominalnych, wyniki zamieszczone w pracy doktorskiej dotyczą znacznie szerszego zakresu pracy sprężarki. Pierwsza część rozdziału zawiera opis metody, a w drugiej zamieszczono wyniki obliczeń dla trzech prędkości obrotowych, oznaczonych jako high, medium i low. Zmiennymi są kąty ustawienia kierownicy wlotowej oraz kierownic w dwóch kolejnych stopniach w zakresie ± 3 stopnie, a funkcją celu jest sprawność izentropowa. W wyniku obliczeń uzyskano interesujące wyniki wskazujące na możliwość wzrostu sprawności lub poprawy zakresu pracy stabilnej sprężarki przy wyższych prędkościach obrotowych i znacznie niższą skuteczność przy niskich prędkościach.

Praca jest zakończona podsumowaniem, wnioskami i rekomendacjami dotyczącymi propozycji zakresu przyszłych prac celem rozwijania omawianej metody projektowania sprężarek osiowych.

3. Uwagi szczegółowe

Układ pracy oraz podział materiału na poszczególne rozdziały nie budzi zastrzeżeń. Przedstawiona praca doktorska jest napisana w języku angielskim, w dość jasny sposób, ale zawiera pomyłki językowe, gramatyczne lub niezbyt trafne określenia, np. „mesh stayed untouched”, czy “lead to wrong deltas”.

Poza ogólnymi uwagami i komentarzami w pierwszej części recenzji nasuwają się poniższe spostrzeżenia i pytania.

1. Dlaczego zastosowano różne siatki dla różnych prędkości obrotowych? Jak w tej sytuacji model może być wykorzystywany do optymalizacji dla różnych punktów pracy?
2. Proszę o dokładniejszą charakterystykę modelu numerycznego i warunków brzegowych. Jeśli wartości są danymi wrażliwymi to proszę o informację, czy warunki sformułowane są w oparciu o wartości stałe, czy są funkcją położenia (np. promienia).
3. Proszę o wyjaśnienie stwierdzenia „discrepancy in boundary layer blockage estimation” na str.52.
4. Proszę o wyjaśnienie z jaką dokładnością jest spełnione kryterium zbieżności masowego natężenia wlot/wylot dla przypadków poza punktami nominalnymi, na krańcach charakterystyk. Jak ewentualne problemy zbieżności rozwiązania numerycznego wpływają na dokładność wyznaczanych charakterystyk?
5. Proszę o podanie specyfikacji warunków brzegowych dla modelu 2D i jakie są różnice w przypadku porównania z modelem 3D.
6. Proszę o wyjaśnienie stwierdzenia ze str. 72 „In all three cases, characteristics are steeper and not showing boundary layer increase towards stability limit as was expected

– blockage of SCM model was fitted to WL operational point.”. Z czego wynika ten wniosek? O jakim przyroście warstwy przyściennej jest mowa i gdzie to można zaobserwować?

7. W odniesieniu do stwierdzenia na str. 79 „all simulations reached numerical convergence”, proszę o wyjaśnienie jakie kryterium zbieżności przyjęto. Jeśli kryterium jest wartość 1% masowego natężenia przepływu, to czy obserwowano fluktuacje masowego natężenia przepływu pomimo spełnionego warunku różnicy 1%?
8. Czy w ramach analiz w rozdziale 4.3 próbowano porównać wyniki obliczeń przepływu 3D z wynikami 2D poprzez uśrednienie obwodowe parametrów przepływu pomiędzy palisadami, lub porównanie linii prądu w oparciu o uśrednione obwodowo składowe prędkości?
9. W tab. 27 podano zakres ograniczeń masowego natężenia przepływu i sprężu. Proszę o wyjaśnienie dlaczego przyjęto tak wąski zakres zmian i jak zwiększenie tego zakresu mogłoby wpłynąć na wyznaczaną sprawność.
10. Proszę o wyjaśnienie stwierdzenia ze str. 117: "This may indicate discrepancy of the data between fidelities." i podanie szczegółów.
11. Analizując wyniki dla prędkości obrotowej „mid”, a w szczególności przyrost sprawności na rys. 5.26, Doktorant stwierdza, że poziom korelacji jest nieakceptowalny, co może wskazywać na słaby poziom próbkowania. Wydaje się, że jest podobny do przypadku prędkości „high”, czy tak? Proszę o wyjaśnienie.
12. Na str. 121 Doktorant stwierdza “The curve of new design is not affected by the numerical phenomena observed for the reference case near the Surge Margin”. Proszę o wyjaśnienie o jakich “numerical phenomena” Doktorant pisze?

4. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Pan mgr inż. Rafał Muchowski przedstawił interesujące wyniki, istotne dla rozwoju metod projektowania osiowych sprężarek lotniczych. W ramach przedstawionych prac opracował koncepcję nazwaną „Multi-Fidelity” celem eksploracji przestrzeni projektowej dla szerokiego zakresu pracy sprężarki i możliwości przewidywania sprawności oraz granicy pracy statecznej sprężarki osiowej. Prace te są częścią zadań realizowanych w MTU Aero Engines Polska, co wyraźnie wskazuje na istotny charakter aplikacyjny pracy doktorskiej.

Wobec powyższego stwierdzam, że Doktorant osiągnął założone cele pracy, rozwijana metoda może być wykorzystywana w procesie projektowania sprężarek osiowych poza nominalnym stanem pracy, a wyniki mają istotne znaczenie użytkowe.

Uważam, że praca Pana mgr inż. mgr inż. Rafała Muchowskiego pt.: „Design and optimization of an axial compressor with use of Multi-Fidelity approach” odpowiada warunkom określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

