

Piotr DOERFFER, prof. dr hab. inż.,
OŚRODEK PRZEPLYWÓW I SPALANIA
ul. Fiszera 14
80-231 Gdańsk
tel.: (+48) 58 5225 202
fax: (+48) 58 341-61-44
e-mail: doerffer@imp.gda.pl

Gdańsk, 4.02.2021

Rada Naukowa ITWL
Prof. dr inż. Grzegorz Kowalczyk
Ul. Księcia Bolesława 6
01-494 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej pod tytułem:
**Influence of the Inlet Air Velocity Profile in Turbofan Engine to the Stall Effect in a
Boundary Layer Ingesting Axial Fan**
mgr inż. Grzegorza Krzysztofiaka

Recenzja została przygotowana na zlecenie ITWL podpisane przez dr inż. Grzegorza Kowalczyka. Dysertacja została przedstawiona na 107 stronach, składa się z trzech rozdziałów i zawiera 8 tabel i 75 rysunków i wykresów. Praca ta odnosi się do 51 pozycji bibliograficznych.

Zawartość rozprawy

Ochrona środowiska oraz ekonomia w lotnictwie stawiają rosnące wyzwania producentom samolotów. Szczególną wagę przywiązuje się do innowacyjnych rozwiązań pozwalających na redukcję hałasu generowanego przez samoloty oraz na redukcję emisji szkodliwych gazów z silników. Jednym z ważnych innowacyjnych trendów jest „zasysanie” warstwy przyściennej przez silnik, określanej po angielsku (b. l. ingestion).

Minimalizacja oporów samolotu poprzez zasysanie warstwy przyściennej przez silnik stała się nowym trendem w rozwoju konstrukcji samolotów. To rozwiązanie zwane BLI stało się nowym wyzwaniem dla konstruktorów silników lotniczych. Konstrukcja sprężarki, która może dobrze pracować w niesymetrycznych warunkach napływu strumienia jest dużym wyzwaniem ponieważ oczekuje się sprawności sprężarki podobnej do symetrycznych warunków napływu strumienia. Poprawa sprawności sprężarki w zburzonym strumieniu napływającym stała się ważnym tematem w badaniach silnikowych.

Przedstawiona w pracy doświadczalna weryfikacja nowych kształtów kierownicy wylotowej (OGV), zoptymalizowanej pod kątem pracy w warunkach BLI, pokazała nie tylko wyraźną poprawę sprawności wentylatora ale również zwiększenie zapasu stabilnej pracy sprężarki.

Badania przeprowadzone w przedstawionej pracy doktorskiej dotyczą niskociśnieniowego osiowego wentylatora ze szczególnym zastosowaniem warunków odpowiadającym lotnictwu. Uzyskane wyniki jednakże mogą być zastosowane do

przemysłowych wentylatorów, turbin gazowych i do systemów wentylacyjnych. Powstawanie niestatecznej pracy w nisko-ciśnieniowych osiowych wentylatorach ma znacznie mniejsze znaczenie niż w wysoko-ciśnieniowych wentylatorach czy sprężarkach.

W pierwszej części dysertacji badania doświadczalne dotyczyły niestacjonarnego ciśnienia na obudowie wentylatora w przypadkach występowania warunków niestateczności pracy. W tej części pracy określano położenie obszarów niestatecznej pracy i ich typ, w zależności od kształtu profilu prędkości na wlocie do stanowiska.

Druga część badań dotyczyła wpływu zaburzenia przepływu na parametry pracy wentylatora.

Dzięki zdefiniowaniu ograniczeń warunków pracy wentylatora przy pomocy CFD możliwym stało się określenie bezpiecznego zakresu pracy oraz zapasu statecznej pracy, już na etapie projektowania. Podkreślono jednakże, że ten zakres pracy jest bardzo trudny w numerycznym modelowaniu i z tego powodu potrzebna jest weryfikacja doświadczalna.

Ocena przedstawionej pracy

Badania doświadczalne są głównym wkładem autora, w czym wykazał się być doświadczonym i pomysłowym badaczem. W pracy kandydat podjął się doświadczalnej weryfikacji symulacji numerycznych i wyznaczenia granicznych stanów pracy wentylatora. Autor traktował wyniki CFD jako zewnętrzną bazę danych, nie omawiając szczegółów zastosowanych metod numerycznych ani strategii symulacji.

Zostało pokazane że można zwiększyć zapas statecznej pracy i zwiększyć sprawność wentylatora działającego w warunkach BLI poprzez modyfikację kształtu łopatek kierownicy wlotowej OGV. Przeprowadzone badania i analiza potwierdziły, że modyfikacja kształtu OGV pozwala na zminimalizowanie skutków zasysania warstwy przyściennej BLI oraz na zwiększenie sprawności wentylatora o 0,9% i zwiększenie marginesu statecznej pracy o 1,1%.

Zaburzenie profilu prędkości na wlocie zostało wygenerowane specjalnie zaprojektowaną siatką dystorsyjną o różnej gradacji oczek. Metoda wycinania laserowego została wykorzystana do wykonania tych siatek. Autor stwierdza, że zaburzenie strumienia wlotowego na stanowisku badawczym jest zgodne z rzeczywistymi warunkami na prototypie samolotu SAX-40. Powstaje jednak podstawowe pytanie czy wiedza na temat zaburzenia wlotu na tym modelu jest naprawdę znana i dostępna. Ta raczej starsza koncepcja samolotu ma wiele różnych wersji. Czy odniesienie się do konkretnego zaburzenia warstwy przyściennej jest realistyczne? Może odniesienie się do SAX-40 nie jest konieczne dla zdefiniowania zadania badawczego?

Szczegóły stanowiska pomiarowego są bardzo ważne ale dysertacja doktorska nie jest raportem technicznym. Przedstawienie schematu elektrycznego oprzyrządowania stanowiska oraz szczegółów aparatury pomiarowej pokazanych na Rys.2.5, w Tabeli 2-2 oraz na Rys.2.6 jest moim zdaniem zbyt wiele.

Wykonane pomiary były bardzo obszerne i wymagające. Wymagały one dużej pracy nad wykonaniem pomiarów i ich przetwarzaniem. Ta wielka ilość pracy spowodowała opracowanie obszernego Rozdziału 2. Jednakże tytuł podrozdziału 2.3 *The mathematical model of determining fan performance and stall margin* jest przesadny ponieważ żaden "model matematyczny" nie został przedstawiony. Zaprezentowane zostały jedynie skomplikowane wyrażenia potrzebne do przetwarzania wyników pomiarowych.

Pięć-otworkowa sonda do pomiaru ciśnień nie pozwalała na badania w pobliżu ściany. Zaproponowano więc hybrydową metodę pomiaru masowego wydatku. Obszar pozbawiony bezpośredniego pomiaru w odległości 30 mm od ścianki został uzupełniony wynikami numerycznych symulacji warstwy przyściennej. To uzupełnienie wyników pomiarowych

wynikami symulacji numerycznych pozwoliło na dokładniejsze wyznaczenie masowego wydatku powietrza na stanowisku pomiarowym.

Niektóre rzeczy w rozprawie są trudne do zrozumienia. Autor pisze, że *Isentropic efficiency is understood as the ratio of the power applied to the system to the power received on the shaft*. W odniesieniu do zastosowanego stanowiska badawczego nie jest to jasne sformułowanie ponieważ moc dostarczona do systemu jest mocą na wale a uzyskana moc to moc w wygenerowanym strumieniu powietrza. W równaniu (17) wyrażenie ΔP_t nie jest jasne i trudno zrozumieć co właściwie oznacza.

Opis w części 2.4 zatytułowanej “Research program” zaczyna się od zdania *The presented test program applies exclusively to fan stall studies and does not include the full test campaign*. To jest dziwne stwierdzenie dlaczego “full test campaign” jest wspomniana jeżeli nie dotyczy pracy doktorskiej. Może powinna być wspomniana przyczyna ograniczenia zakresu pracy doktorskiej w stosunku do prowadzonych badań.

Wnioski

Autor wykazał, że zaburzenie profilu prędkości BLI na wlocie do niskociśnieniowego wentylatora osiowego ma istotny wpływ na wywołanie pompażu silnika lotniczego. Przedstawione badania mają wkład w zwiększenie wiedzy w obszarze pracy wentylatora oraz na wpływ zaburzenia wlotowego profilu prędkości wywołanego zasysaniem warstwy przyściennej.

Uzyskane wyniki pozwoliły autorowi na wyciągnięcie istotnych wniosków:

- warunki BLI nie mają wpływu na kierunek obrotu wirującego oderwania oraz na ilość komórek wirującego obszaru oderwania
- proporcja częstotliwości wirującego oderwania do częstotliwości łopatkowej dla obu badanych przypadków pozostaje stałą i oscyluje w okolicy 4%
- pojawienie się niestabilności w warunkach BLI jest poprzedzone poprzez miejscowe oderwanie przepływu nazwane przez autora “Local Stall Region”.
- obszar miejscowego oderwania jest poprzedzony przez kilka pików ciśnienia statycznego nazwanego “Local Stall Warning Shots”, z częstotliwością 10 Hz
- przejście lokalnego oderwania w wirujące oderwanie realizuje się w trakcie dwóch obrotów wentylatora
- zostało pokazane również, że zaburzenie wynikające z zasysania warstwy przyściennej prowadzi do 9,1% redukcji zapasu statecznej pracy wentylatora w stosunku do niezburzonych warunków na wlocie przy referencyjnej prędkości.

Odnosząc się do uzyskanych wyników można wnioskować, że wprowadzenie zburzonych warunków na wlocie powoduje 2% redukcję sprawności izentropowej w stosunku do przypadku bazowego (BSL) w punkcie projektowym (DP).

W obu przypadkach pomiarowych, kiedy powstało oderwanie, pojawiły się silne oscylacje masowego wydatku. Przy zastosowaniu warunków BLI wystąpiły fluktuacje wydatku masowego (MFR) już w warunkach zbliżonych do oderwania. To wykazuje, że zbliżanie się do oderwania, w przypadku wirnika z zaburzeniem typu BLI, poprzedzone jest powstaniem miejscowego oderwania.

Zastosowanie zasysania warstwy przysciennej BLI powoduje wzrost poziomu turbulencji i radykalne spowolnienie przepływu azymutalnego, w którym znajduje się płyn o niskim pędzie. W warunkach miejscowego oderwania poziom turbulencji przepływu rośnie do około 60%, co jest wielokrotnie więcej niż 15% poziom turbulencji mierzony w warunkach poprzedzających oderwanie w konfiguracji podstawowej.

W obu przypadkach pomiarowych wchodzeniu wentylatora w stan oderwania towarzyszą poważne oscylacje ciśnienia statycznego. W warunkach zaburzonego strumienia BLI te oscylacje występują podczas generacji miejscowego oderwania. Możliwa staje się detekcja miejscowego obszaru oderwania przy pomocy niskoczęstotliwościowego pomiaru ciśnienia statycznego.

W wyniku doświadczalnej weryfikacji symulacji numerycznych stwierdzić można dobrą zgodność porównywanych wyników. Dotyczy to zarówno struktury przepływu jak i ogólnych parametrów pracy wentylatora.

Badania doświadczalne potwierdziły, że wentylator w warunkach zasysania warstwy przyściennej może pracować stabilnie w obszarze bliskim oderwaniu (NS) pomimo wystąpienia miejscowego oderwania.

Zapas statecznej pracy wentylatora jest mniejszy ale wykazuje symptomy zbliżającego się oderwania w postaci miejscowych obszarów oderwania. Ale te miejscowe oderwania nie redukują wydatku mostowego wentylatora w widoczny sposób.

Potwierdzono, że wprowadzone modyfikacje kształtu kierownic wylotowych OGV pozwoliły na zminimalizowanie wpływu zaburzonego profilu prędkości na wlocie oraz pozwoliły na zwiększenie sprawności o 0,9 % i zwiększenie marginesu niestabilnej pracy o 1,1%.

Wszystkie wyżej przedstawione powyższe konkluzje mają bezpośrednie odniesienie praktyczne. Są szczególnie ważne dla osiowych wentylatorów stosowanych w silnikach lotniczych i pozwalają na wysterowanie czujników ciśnienia pracujących w sprzężeniu zwrotnym systemu ochrony przed oderwaniem i pompażem.

Przyszłe perspektywy pracy

W przyszłej pracy autor zamierza kontynuować prace doświadczalne nad zjawiskiem pompażu, nad rozwojem oderwania w warunkach napływu jednorodnego jak i strumienia zaburzonego typu BLI. Wyzwaniem badawczym dla autora będzie możliwość wizualizacji oderwania powstającego na łopatkach, a także podjęcie badań nad wysko-ciśnieniowym wentylatorem.

Konkluzja recenzji

Powyżej przedstawione krytyczne uwagi wynikają z szerokiego zakresu przedstawionej rozprawy. Nie wpływają one jednak na wartość przedstawionej pracy doktorskiej. Przedstawiony materiał badawczy będzie niewątpliwie źródłem dalszych badań i analiz.

Jestem przekonany, że przedstawiona praca doktorska spełnia kryteria stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. Nr 65, poz 595 z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

