

Abstract

The appearance of stall on blades of a turbofan engine is defined as the most dangerous state of its operation. It is also a phenomenon that causes unstable engine operation, severe deterioration in performance parameters, flow pulsation and high structural vibration. It can also lead to compressor's surge, rapid increase in temperature in the combustion chamber and ultimately, to serious mechanical damage to the engine.

Determining the fan performance map and its stall margin is a very important stage in a design process of an aircraft engine. However, the vast majority of research results available in the literature concern the analysis of the stall or surge phenomenon of an aircraft engine in conditions of axisymmetrical air flow at its inlet. The appearance of flow distortion at the engine inlet and its influence on the performance parameters, as well as determination of the fan stall margin, remain insufficiently investigated.

The author of this dissertation, by analyzing the current state of knowledge in the field of research devoted to the first stage of a turbofan engine operating in a disturbed flow, proves that the disturbance of the velocity profile at the engine inlet caused by the Boundary Layer Ingestion (BLI) has a significant impact on the way the stall is formed.

The dissertation is an independent part of a large test campaign aimed at developing a methodology for designing a low-pressure fan capable of operating under clean and disturbed inlet airflow conditions with as little decrease in efficiency as possible.

Experimental research on the development of stall phenomenon was carried out on the low pressure fan working in the axially symmetrical air flow, the fan with airflow distortion caused by the BLI phenomenon as well as the fan with the numerically optimized shape of the Outlet Guide Vanes (OGV).

A special prototype of axial fan test rig was used in this study, with the distortion screen designed to reproduce the flow velocity profile of the future SAX-40- Initiative airplane. Eleven high-frequency miniature pressure XCQ-062 Kulite transducers were used. The unsteady pressure sensors were placed in circumferential and axial position in the casing in the rotor tip-path plane.

As a result of the tests, the author proves that changing the air velocity profile at the inlet caused by the BLI phenomenon causes the fan to enter the state of flow separation in diametrically different ways. The entering into the stall for the rotor in the BLI configuration is preceded by a local separation of the flow. That flow separation occurs in the region where the fan blades exit the region of low-momentum fluid, creating a local separation area named by the author “Local Stall Region”.

With the BLI distortion applied, the region with the local flow separation is preceded by several static pressure peaks called by the author “Local Stall Warning Shots”, which appear with a frequency of 10 Hz. Further throttling of the fan causes the region to transform into the Rotating Stall. The transformation of the local separation into the Rotating Stall occurs during 2 full revolutions of the fan blades.

The introduction of flow disturbance caused by the BLI phenomenon does not have a significant effect on the cells’ spin speed and the number of rotating stall cells. The ratio of Rotating Stall Frequency to Blade Pass Frequency for all configurations remains constant and oscillates around 4%.

At the same time, for reference fan speeds, in case of the BLI fan, the flow separation occurs for higher air mass expenditure than for the fan without the distortion, thus reducing its experimentally measured Stall Margin from 16.5% to 7.4% i.e. by 9.1%.

Based on the results, it can be concluded that the implementation of the distorted velocity profile at the rotor inlet caused a 2% reduction in a fan isentropic efficiency compared to the baseline configuration at design point and for the fan reference speed.

Importantly, the analysis carried out by the author confirmed that thanks to the modification of the shape of the OGV, it is possible to minimize the impact of the disturbed velocity profile at the BLI fan inlet, to improve its efficiency by 0.9% and to increase the stall margin by 1.1%.

An important conclusion from the perspective of exploitation and safety of the use of axial fans is the fact that the fan operating in BLI conditions, despite the smaller Stall Margin, exhibits the symptoms of the approaching stall phenomenon in the form of local LSR flow separation. Importantly, the local flow separation does not significantly reduce the mass flow of air pumped by the fan.

The research was concerned with the low-pressure axial fan with particular applications in the aviation industry; however, the results may also apply to industrial fans, gas turbines and ventilation systems. The findings suggest that this approach may also be useful in the maritime, civilian, and military industries.

The author describes the remedial measures taken to minimize the situation by the modification of the fan design. This work represents a significant improvement in the state of the art.

Keywords:

Stall, rotating stall, fan performance, BLI, boundary layer ingestion, local stall warning shots, local stall region, stall margin, surge, axial fan

Streszczenie

Pojawienie się oderwania przepływu na łopatkach silnika turbowentylatorowego określane jest, jako najbardziej niebezpieczny stan jego pracy. Jest to również zjawisko, które powoduje niestateczną pracę silnika, poważne pogorszenie parametrów osiągowych, pulsacje przepływu i wysokie wibracje konstrukcji. Może również prowadzić do pompażu sprężarki, gwałtownego wzrostu temperatury w komorze spalania i finalnie do poważnego uszkodzenia mechanicznego silnika.

Wyznaczenie mapy wentylatora oraz zapasu statecznej jego pracy jest bardzo ważnym etapem projektowania silnika lotniczego. Jednakże, zdecydowana większość wyników badań naukowych dostępnych w literaturze dotyczy analizy zjawiska pompażu silnika lotniczego w warunkach symetrycznego napływu powietrza na jego wlocie. Pojawienie się zaburzenia przepływu na wlocie do silnika oraz wpływ tego zaburzenia na parametry osiągowie, jak również określenie zapasu statecznej pracy wentylatora, jest nadal niedostatecznie zbadane.

Autor niniejszej dysertacji, analizując aktualny stan wiedzy w zakresie badań pierwszego stopnia sprężarki silnika turbowentylatorowego pracującego w przepływie zaburzonym udowadnia, że zaburzenie profilu prędkości na wlocie do silnika wywołane zjawiskiem zasysania warstwy przyściennej ("BLI") wywiera istotny wpływ na sposób formowania się strefy oderwań na łopatkach wentylatora.

Rozprawa jest niezależną częścią dużej kampanii testowej mającej na celu opracowanie metodyki projektowania wentylatora niskiego ciśnienia, zdolnego do pracy w warunkach czystego i zaburzonego przepływu powietrza na wlocie i przy jak najmniejszym spadku jego wydajności.

Badania eksperymentalne rozwijania strefy oderwań przeprowadzono na wentylatorze z osiowosymetrycznym napływem powietrza, wentylatorze z zaburzonym profilem prędkości spowodowanym zjawiskiem BLI oraz wentylatorze z zoptymalizowanym numerycznie do pracy w zaburzeniu kształtem kierownic zawirnikowych ("OGV").

Specjalnie zaprojektowany prototyp stanowiska do testowania wentylatorów osiowych, wraz z siatką dystorsyjną o różnej gradacji oczek, pozwolił na precyzyjne odtworzenie profilu prędkości na wlocie do silników samolotu SAX-40-Initiative.

Do detekcji strefy oderwań użyto jedenastu wysokoczęstotliwościowych czujników Kulite XCQ-062. Czujniki te umieszczono obwodowo i wzdłużnie w obudowie wentylatora, w płaszczyźnie wirowania wirnika.

W wyniku przeprowadzonych analiz FFT niestacjonarnych pomiarów ciśnienia autor wykazuje, że zmiana profilu prędkości powietrza na wlocie wywołana zjawiskiem BLI powoduje diametralnie różny sposób wchodzenia wentylatora w stan jego niestatecznej pracy.

W przypadku wentylatora pracującego z zaburzeniem BLI, separacja strug następuje w obszarze wyjścia łopatek wentylatora z zaburzenia, tworząc obszar lokalnego oderwania przepływu nazwany przez autora „Local Stall Region”. Obszar o lokalnym oderwaniu przepływu poprzedzony jest kilkoma charakterystycznymi pikami na sygnale ciśnienia statycznego nazwanymi przez autora „Local Stall Warning Shots”, których to częstotliwość występowania wynosi 10Hz. Dalsze dławienie wentylatora prowadzi do pojawienia się wirującego pęcherza oderwania, przy czym sam proces rozwija następuje się w trakcie dwóch pełnych obrotów łopatek wirnika.

Implementacja zaburzenia przepływu spowodowanego zjawiskiem BLI nie wywiera istotnego wpływu na prędkość i liczbę wirujących obszarów oderwania. Stosunek prędkości wirowania obszaru oderwania do częstotliwości przejścia łopatek wirnika we wszystkich konfiguracjach testowych pozostaje stały i oscyluje wokół wartości 4%.

Jednocześnie, dla nominalnej prędkości obrotowej wentylatora i w przypadku wentylatora z zaburzeniem BLI, pojawia się obszar lokalnego oderwania przepływu LSR, zmniejszający zapas statecznej pracy wentylatora z 16,5% do 7,4% tj. o 9,1 punktu procentowego.

Dla zaburzonego przepływu wentylator charakteryzuje się mniejszą o 2 punkty procentowe sprawnością izentropową w stosunku do wentylatora pracującego w przepływie bez zaburzenia, przy czym stosunek ten jest prawie stały dla wszystkich badanych prędkości obrotowych wentylatora.

Co istotne, przeprowadzona przez autora analiza potwierdziła, że dzięki modyfikacjom kształtu statora, można zminimalizować wpływ zaburzonego profilu prędkości BLI i poprawić sprawność wentylatora o 0,9 punktu procentowego oraz zwiększyć zapas statecznej pracy wentylatora o 1,1 punkt procentowego.

Ważnym wnioskiem z punktu widzenia eksploatacji i bezpieczeństwa użytkowania wentylatorów osiowych jest fakt, że wentylator pracujący w warunkach BLI, pomimo mniejszego zapasu statecznej pracy, przed wejściem w obszar wirującego oderwania sygnalizuje ten moment nawet kilkanaście sekund wcześniej w postaci lokalnego oderwania przepływu LSR, które występuje na wyjściu łopatek z rejonu o zaniżonej prędkości.

Równie ważnym wnioskiem jest to, że pojawienie się lokalnego obszaru oderwania LSR nie wpływa znacząco na zmniejszenie wydatku masowego powietrza tłoczonego przez wentylator.

Przeprowadzone badania naukowe i analiza wyników ukierunkowana jest szczególnie na zastosowanie w przemyśle lotniczym, niemniej wyniki badań mają zastosowanie również dla wentylatorów przemysłowych, turbin gazowych systemów wentylacyjnych, farm wiatrowych, zarówno w przemyśle cywilnym, jak i wojskowym.

Słowa kluczowe:

BLI, strefa oderwania, pompaż, niestateczna praca wentylatora, sprężarka, wentylator osiowy, silnik BLI, zapas statecznej pracy sprężarki, wirujące oderwanie przepływu