

Doświadczalno-numeryczne charakterystyki wieńca wirnikowego wentylatora osiowego dla różnych wartości szczeliny wierzchołkowej

Experimental and numerical characteristics of the rotor rim of axial fan with different tip clearance values

MICHAŁ JASZTAŁ
MACIEJ MAJCHER*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.8-9.68>

Obiektem badań, opisanym w niniejszym artykule, był wieńiec wirnikowy wentylatora osiowego firmy MULTWING o oznaczeniu 5ZL. Przeprowadzono badania doświadczalne wentylatora z wirnikiem zamontowanym z fabrycznym luzem promieniowym wynoszącym 5 mm. Odwzorowano geometrię wieńca wirnikowego i przeprowadzono symulacje numeryczne, w wyniku których wyznaczono przemieszczenia wierzchołka łopatki wirnikowej. Na podstawie wyników symulacji mechanicznych oraz formuły Traupela stwierdzono możliwość zmniejszenia szczeliny wierzchołkowej do 1 mm. W kolejnym kroku wykonano numeryczne symulacje przepływowo dla obu wartości luzu promieniowego. Uzyskane wyniki w formie charakterystyk wentylatora osiowego porównano z wynikami doświadczalnymi.

SŁOWA KLUCZOWE: CFD, MES, luz promieniowy, charakterystyki wentylatorów osiowych

In this paper the object of research was the rotor rim of axial fan manufactured by MULTWING with the designation 5ZL. Experimental tests of the fan with the above mentioned rotor rim were carried out with factory tip clearance of 5 mm. Next, the geometry of the rotor rim was mapped and numerical simulations were carried out, as a result of which, displacements of the tip of the rotor blade were determined. Based on the results of mechanical simulations and the Traupel formula the possibility was found to reduce the tip clearance to 1 mm. In the next step, numerical flow simulations were performed for both tip clearance values. Obtained results, in the form of basic characteristics of axial fan, were compared with experimental results.

KEYWORDS: CFD, FEM, tip clearance, characteristics of axial fan

Wprowadzenie

W każdej maszynie przepływowej między łopatkami wieńca wirnikowego a osłoną musi zostać zachowany dystans, nazywany luzem promieniowym lub szczeliną wierzchołkową [10]. Ta szczelina zapobiega tarcia elementów wirujących o elementy nieruchome.

Wartość luzu wynika m.in. z [9]:

- wychyleń wału w czasie drgań,
- wydłużeń cieplnych elementów maszyny,
- ugięcia wału pod wpływem sił poprzecznych,
- luzów montażowych mocowań łopatek,
- odchyłek wykonania elementów maszyny,
- wydłużeń łopatek wirnika pod działaniem sił odśrodkowych.

Te czynniki determinują minimalną wartość luzu promieniowego [9]. Jednocześnie należy pamiętać, że zbyt duża szczelina wierzchołkowa generuje straty przepływu rzutujące na osiągi maszyn przepływowych [9].

Wartość luzu wierzchołkowego, zapewniającego bezpieczeństwo pracy elementów wirujących przy minimalnym stratach przepływu, można ustalić m.in. na podstawie wartości wydłużenia łopatek wirnikowych. Jedną z metod oceny wydłużenia łopatek wirnikowych w trakcie pracy jest symulacja numeryczna. Obecnie analizy odkształceń mechanicznych oparte na metodzie elementów skończonych (MES) pozwalają na uzyskiwanie wyników zbliżonych z wynikami doświadczalnymi. Wyniki analiz mechanicznych w połączeniu z analizami przepływowymi umożliwiają ustalenie bezpiecznej wartości luzu wierzchołkowego z jednoczesną oceną jego wpływu na osiągi tego typu maszyn.

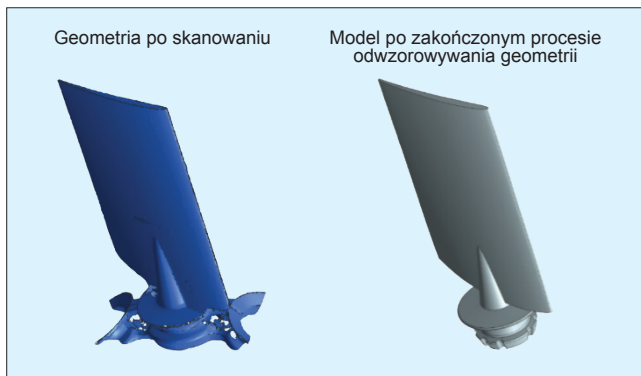
Autorzy artykułu wykonali numeryczne analizy mechaniczne i przepływowe modelu 12-łopatkowego wieńca wirnikowego wentylatora osiowego firmy MULTWING o oznaczeniu 5ZL. Zewnętrzna średnica wieńca wirnikowego wynosi 700 mm, zatem jest on przeznaczony do wentylatorów, których wewnętrzna średnica obudowy wynosi 710 mm (to daje luz wierzchołkowy wynoszący 5 mm).

Wirtualny model wieńca wirnikowego

Do przeprowadzenia numerycznych analiz mechanicznych i przepływowych niezbędny jest model badanego obiektu. Wirtualny model łopatki wieńca wirnikowego uzyskano z wykorzystaniem skanowania optycznego, przeprowadzonego skanerem optycznym GOM ATOS 2. W tym przypadku podstawą procesu skanowania jest analiza prążków rzutowanych na skanowaną powierzchnię. Te prążki są rejestrowane przez kamerę i przetwarzane, za pomocą odpowiednich algorytmów oprogramowania skanera w celu uzyskania chmury punktów stanowiącej odwzorowanie skanowanej powierzchni [2]. Na rys. 1 pokazano geometrię zeskanowanej łopatki wirnikowej tuż po zaimportowaniu do oprogramowania Siemens NX 8.5 oraz model łopatki po odwzorowaniu jej geometrii. Zeskanowana geometria zawiera wiele nieciągłości powierzchni oraz pustych przestrzeni, co uniemożliwia przeprowadzenie dyskretyzacji na potrzeby symulacji numerycznych. W związku z tym konieczne są dalsze operacje na modelu, aby uzyskać geometrię o odpowiedniej jakości.

Końcowy efekt modelowania CAD poddano dyskretyzacji i uzyskano modele do analiz numerycznych.

* Dr inż. Michał Jaształ, michal.jasztal@wat.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4133-2557> – Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa, Polska
Mgr inż. Maciej Majcher, maciej.majcher@wat.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-4094-8766> – Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa, Polska



Rys. 1. Geometria zeskanowanej łopatki wieńca wirnikowego i jej model po zakończonym procesie odwzorowywania

Zastosowana metoda komputerowej mechaniki płynów

Numeryczne symulacje przepływu przez wieńce wirnikowe przeprowadzono w programie ANSYS Fluent, bazując na tzw. uśrednionych równaniach Naviera–Stokesa RANS [4]. W celu rozwiązania układu równań RANS należy wykorzystać odpowiedni model turbulencji. W tym przypadku do wyznaczenia charakterystyk wieńca wirnikowego zastosowano model realizabilny $k-\epsilon$ [1].

Na podstawie przeprowadzonych symulacji przepływu uzyskano następujące charakterystyki:

- przyrostu ciśnienia całkowitego (sprężu wentylatora) w funkcji objętościowego wydatku przepływu – $\Delta p_c = f(Q)$,
- sprawności całkowitej w funkcji objętościowego natężenia przepływu – $\eta = f(Q)$,
- mocy w funkcji objętościowego natężenia przepływu – $P = f(Q)$.

Dyskretyzacja obszaru obliczeniowego i warunki brzegowe do obliczeń przepływowych

Na potrzeby symulacji przepływu powietrza przez wieńce wirnikowe utworzono jego model dyskretny. Na powierzchniach obszaru obliczeniowego wykorzystano elementy trójkątne. W obszarze warstwy przyściennej zastosowano pięć warstw elementów pryzmatycznych, natomiast w pozostałej objętości obszaru obliczeniowego – elementy czworoboczne. W efekcie uzyskano tzw. hybrydową siatkę numeryczną, odpowiednią do skomplikowanych geometrii, składającą się z 7410327 elementów.

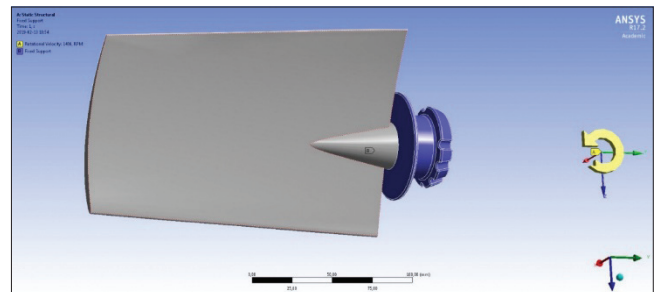
Numeryczne symulacje przepływu przeprowadzono z wykorzystaniem modelu SRF (*single reference frame*) [1], przeznaczonego do analiz przepływowych pojedynczych, wirujących części maszyn wirnikowych oraz umożliwiającego zdefiniowanie tzw. okresowych warunków brzegowych. Okresowe warunki brzegowe pozwalają na zamodelowanie kanału przepływowego dla jednej łopatki, natomiast algorytm programowe przeliczają parametry przepływu z uwzględnieniem wzajemnej interferencji łopatek. Dzięki temu skraca się czas generowania siatek oraz czas obliczeń. Tego typu warunki brzegowe są typowe dla symulacji przepływu przez wieńce łopatkowe wentylatorów [6, 7].

Numeryczne symulacje przepływowe realizowano przy następujących warunkach brzegowych:

- wlot do wentylatora – ciśnienie względne 0 Pa,
- wylot z wentylatora – ciśnienie zmienne (dławienie),
- prędkość obrotowa – 1486 obr/min (piasta),
- ciśnienie odniesienia – 101 325 Pa.

Analiza wydłużenia pióra łopatki wirnikowej

Numeryczne obliczenia wydłużenia pióra łopatki wirnikowej wykonano w programie ANSYS R17.2 [3, 5]. Analizę przeprowadzono dla obciążeń łopatki wywołanych siłami masowymi w ruchu obrotowym z prędkością obrotową $n = 1486$ obr/min. Model CAD badanej łopatki oraz sposób jej obciążenia i utwierdzenia w zamku przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Model CAD łopatki rozciąganej siłami masowymi w ruchu obrotowym i utwierdzonej w zamku

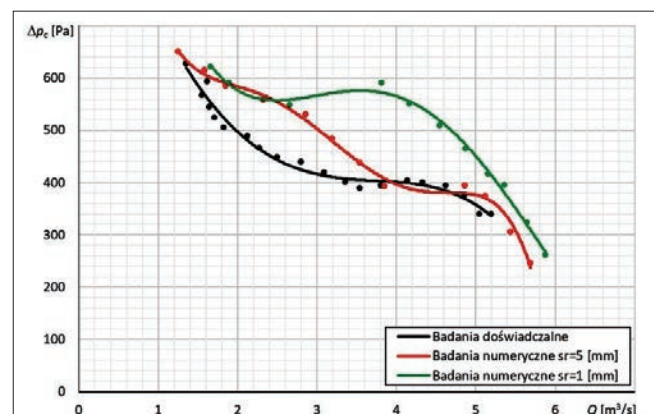
Przyjęto, że badany element został wykonany ze stopu aluminium o module Younga $E = 7,1 \cdot 10^{10}$ Pa oraz współczynnika Poissona $\nu = 0,33$. W wyniku obliczeń numerycznych uzyskano maksymalną wartość przemieszczenia wierzchołka pióra łopatki w kierunku promieniowym, wynoszącą $u = 0,016$ mm. Na podstawie analiz wydłużenia pióra łopatki podczas jej pracy ustalono, że istnieje możliwość zmniejszenia wartości luzu wierzchołkowego badanego wentylatora. Bazując na formule Traupela [10]:

$$s_r = \frac{0,6 \cdot D_z}{1000} + 0,25 \text{ mm}$$

gdzie s_r jest wartością luzu promieniowego, a D_z – średnicą zewnętrzną wentylatora, w wirtualnym modelu wieńca wirnikowego zastosowano szczelinę wierzchołkową o wielkości 1 mm i przeprowadzono ponowne symulacje numeryczne przepływu powietrza przez wentylator w celu zweryfikowania wpływu zmniejszenia szczeliny na osiągi wentylatora.

Wyniki symulacji przepływu przez wieńce wirnikowe

Na rys. 3 pokazano charakterystyki przyrostu ciśnienia całkowitego w funkcji objętościowego natężenia przepływu wieńca wirnikowego. Na podstawie tych charakterystyk można stwierdzić, że zgodność wyników doświadczalnych i numerycznych dla wieńca wirnikowego o luzie



Rys. 3. Charakterystyki przyrostu ciśnienia całkowitego wieńca wirnikowego wentylatora osiowego, uzyskane dwiema metodami badawczymi

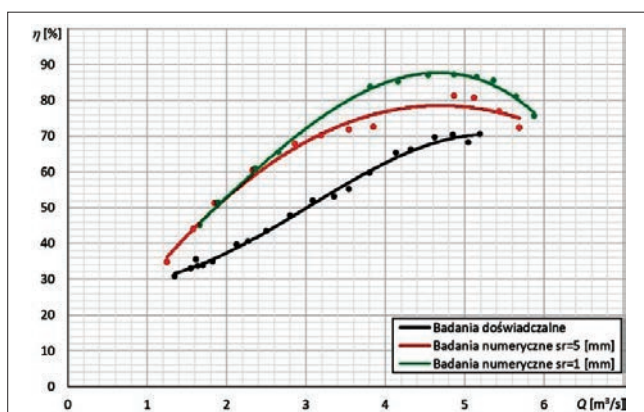
wierzchołkowym $s_r = 5$ mm jest zadowalająca. Średnia różnica względna wyników w całym zakresie objętościowych natężeń przepływu, uzyskanych w doświadczeniu, wyniosła 10,75%.

Największą różnicę w wynikach zaobserwowano dla wydatków od ok. 1,65 do ok. 3,54 m³/s, a jej średnia względna wartość wyniosła 17%. Najmniejszą różnicę charakterystyk uzyskano dla zakresu wydatków od ok. 3,80 do ok. 5,17 m³/s, a jej średnia względna wartość wyniosła 4,96%.

Analiza charakterystyk potwierdziła, że zmniejszenie wartości luzu promieniowego do 1 mm spowodowało wzrost przyrostu ciśnienia całkowitego z przesunięciem jego maksymalnej wartości w stronę niższych wydatków przepływu. Średni względny przyrost ciśnienia całkowitego w odniesieniu do charakterystyki dla $s_r = 5$ mm wyniósł 20,23% w zakresie wydatków od ok. 2,33 do ok. 5,69 m³/s. Największy przyrost sprężu wentylatora uzyskano dla natężeń przepływu od ok. 2,86 do ok. 4,87 m³/s, a jego względna średnia wartość wyniosła 34,32%.

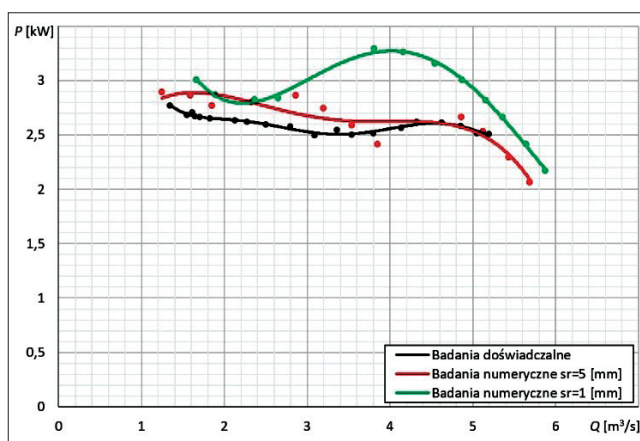
Na rys. 4 pokazano charakterystyki sprawności całkowitej w funkcji objętościowego natężenia przepływu wieńca wirnikowego. Jak widać, charakterystyka uzyskana numerycznie zdecydowanie się różni od charakterystyki doświadczalnej. Wpływ na to miał przede wszystkim fakt, że w symulacjach nie uwzględniono napędu wieńca wirnikowego przez silnik elektryczny. Zgodnie z normą [8] sprawność obliczana na podstawie wyników doświadczalnych stanowi stosunek mocy strumienia powietrza do mocy silnika napędzającego wentylator. Jednocześnie należy też pod uwagę chropowatości omywanych powierzchni. Względna średnia różnica sprawności całkowitej wyznaczonej numerycznie wyniosła 29,08%.

Konsekwencją zmniejszenia luzu promieniowego do 1 mm był średni względny wzrost sprawności, wynoszący 8% dla wydatków od ok. 2,33 do ok. 5,69 m³/s, w odniesieniu do wyników symulacji numerycznych dla $s_r = 5$ mm. Ten wzrost wynika ze spadku strat przepływu wywołanych obecnością szczeliny wierzchołkowej. Można zatem uznać, że właśnie taki poziom powinien osiągnąć przyrost sprawności rzeczywistego wieńca przy zmniejszeniu luzu wierzchołkowego.



Rys. 4. Charakterystyki sprawności całkowitej wieńca wirnikowego wentylatora osiowego, uzyskane dwiema metodami badawczymi

Na rys. 5 przedstawiono charakterystyki mocy w funkcji objętościowego natężenia przepływu wentylatora osiowego, wyznaczone dwiema metodami badawczymi. W tym przypadku uzyskano zadowalającą zgodność wyników doświadczalnych i numerycznych. Średnia różnica względna mocy w całym zakresie objętościowych natężeń



Rys. 5. Charakterystyki mocy wentylatora, uzyskane dwiema metodami badawczymi

przepływu w badaniach doświadczalnych wyniosła 4,82%. Po zmniejszeniu luzu wierzchołkowego do 1 mm nastąpił wzrost mocy wentylatora, co wynika ze zwiększonej powierzchni łopatki.

Wnioski

W artykule przedstawiono porównanie podstawowych charakterystyk wentylatora osiowego. Charakterystyki te otrzymano na podstawie badań doświadczalnych oraz numerycznych. W przypadku charakterystyki przyrostu ciśnienia całkowitego oraz mocy w funkcji objętościowego natężenia przepływu uzyskano zadowalającą zgodność wyników doświadczalnych i numerycznych.

Numeryczne analizy mechaniczne potwierdziły możliwość zmniejszenia luzu promieniowego z 5 mm do 1 mm (ze względu na niewielkie wydłużenia łopatki wirnikowej w trakcie jej pracy).

Omówiono wyniki dla dwóch wartości szczeliny wierzchołkowej i wykazano jej istotny wpływ na osiągi wentylatorów osiowych. Po zmniejszeniu luzu promieniowego zanotowano wzrost przyrostu ciśnienia całkowitego oraz sprawności.

LITERATURA

- [1] ANSYS Fluent. 2013. "Theory Guide. Release 15.0".
- [2] Dziubek T., Oleksy M. „Zastosowanie systemu optycznego ATOS II w technikach szybkiego prototypowania modeli kół zębatych otrzymanych na bazie żywicy epoksydowej”. *Polimery*. 62, 1 (2017): 44–51.
- [3] Jaształ M., Pietras A. „Analityczna i numeryczna analiza wytrzymałości wirnika wentylatora z uwzględnieniem rozrzutów losowych wybranych wielkości”. *Mechanik*. 7 (2015): 345–356.
- [4] Kazimierski Z. „Podstawy mechaniki płynów i metod komputerowej symulacji przepływu”. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2004.
- [5] Krzesiński G., Zagrajek T., Marek P., Borkowski P. „Metoda elementów skończonych w mechanice materiałów i konstrukcji. Rozwiązanie wybranych zagadnień za pomocą systemu ANSYS”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2015.
- [6] Majcher M., Wrzesień S., Frant M. „The Impact of Mesh Quality and Mesh Adaptation on the Results of Numerical Solution of the Axial Fans”. *Summary of Proceedings. NAFEMS World Congress 2015*. USA.
- [7] Minkov L.L., Pikushchak E.V. „Numerical simulation of single-stage axial fan operation under dusty flow conditions”. *Journal of Physics Conference Series*. 919 (2017) 012016.
- [8] PN-EN ISO 5801:2008 – Wentylatory przemysłowe – Badanie charakterystyk działania na stanowiskach znormalizowanych.
- [9] Tuliszka E. „Sprężarki, dmuchawy i wentylatory”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1976.
- [10] Witkowski A. „Sprężarki wirnikowe. Teoria, konstrukcja, eksploatacja”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013. ■