Numeryczno-doświadczalna weryfikacja projektu analitycznego wentylatora osiowego

Numerical and experimental verification of analytical project of the axial fan

MACIEJ MAJCHER STANISŁAW WRZESIEŃ MICHAŁ FRANT*

Porównano podstawowe charakterystyki wentylatora osiowego uzyskane za pomocą trzech metod badawczych: analitycznej, doświadczalnej i numerycznej. Przeanalizowano charakterystyki przyrostu ciśnienia całkowitego, sprawności i mocy. Omówiono wpływ odchylenia geometrii wyprodukowanego wieńca wirnikowego od założeń wynikających z projektu analitycznego. Potwierdzono poprawność zastosowanego schematu projektowania wentylatora osiowego opartego na metodach analitycznych, numerycznych i doświadczalnych. SŁOWA KLUCZOWE: CFD, charakterystyki wentylatorów osiowych, maszyny przepływowe

The paper presents a comparison of basic axial fan characteristics obtained by three research methods: analytical, experimental and numerical. Characteristics of the total pressure, efficiency and power were analyzed. The influence of the geometry deviation of the manufactured rotor rim from the assumptions resulting from the analytical design was discussed. The correctness of the axial fan designing scheme based on analytical, numerical and experimental methods was confirmed.

KEYWORDS: CFD, characteristics of axial fans, fluid-flow machines

Wprowadzenie

Punktem wyjścia w projektowaniu wentylatorów osiowych są algorytmy analityczne oparte na modelu palisady prostoliniowej. Palisadą nazywa się nieskończony ciąg jednakowych profili o cięciwach równoległych do siebie i tak ustawionych, że dowolne odpowiadające sobie punkty profili leżą na prostej [9].

Jak każdy model analityczny, model palisady prostoliniowej ma zalety i dość istotne wady. Do jego zalet należą: prostota opisu kinematyki przepływu, możliwość oszacowania charakterystyk projektowanego wentylatora i łatwość określenia geometrii wentylatora w odniesieniu do zakładanych osiągów. Najistotniejsze wady modelu palisady prostoliniowej to brak możliwości dokładnego oszacowania strat przepływu i brak możliwości uwzględnienia interakcji między wieńcem wirnikowym i kierowniczym oraz negatywnych zjawisk aerodynamicznych (np. oderwania), a przede wszystkim sprowadzenie przepływu do przypadku ustalonego przepływu płaskiego. Te uproszczenia nie pozwalają na pełne ujęcie zjawisk zachodzących w rzeczywistym przepływie czynnika roboczego przez wieńce łopatkowe tego typu maszyn. Stąd wynika konieczność weryfikacji projektów analitycznych wentylatorów osiowych.

Z analizy stanu zagadnienia [5,8,13] wynika, że badania numeryczne pozwalają na uzyskiwanie jakościowych i ilościowych wyników zbieżnych z wynikami badań doDOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.8-9.75

świadczalnych. Z powodzeniem można więc wykorzystać symulacje numeryczne do weryfikacji projektów wentylatorów osiowych realizowanych na podstawie algorytmu analitycznego, co zminimalizuje liczbę badań doświadczalnych.

Projekt analityczny wentylatora

Analityczny projekt wieńca wirnikowego i kierowniczego wentylatora osiowego wykonano na podstawie algorytmów dostępnych w literaturze [7, 10, 11]. Punktem wyjścia projektu analitycznego był nominalny wydatek objętościowy wynoszący $Q = 8 \text{ m}^3$ /s oraz założona średnica zewnętrzna i wewnętrzna wynoszące odpowiednio: 700 mm i 450 mm. Dla tak zdefiniowanych danych ustalono, że zakres przyrostu ciśnienia całkowitego (sprężu wentylatora) powinien się wahać w granicach $\Delta p_c = 3000 \div 3300 \text{ Pa}.$

Jak wspomniano, algorytmy analityczne są oparte na modelu palisady prostoliniowej, której przykład pokazano na rys. 1. W projekcie analitycznym wentylatora, dla siedmiu obranych przekrojów łopatki wirnikowej, ustalono cięciwę profilu *I*, podziałkę palisady *t* oraz kąt ustawienia profili w palisadzie na podstawie obliczonych kątów łopatkowych: $\beta_1 * i \beta_2 * oraz \alpha_2 * i \alpha_3^*$, odpowiednio dla wieńca wirnikowego i kierowniczego (rys. 1).



Przyjęto, że profilem 14 łopatek wirnikowych będzie NACA 65-810, którego charakterystyki w układzie palisadowym są ogólnodostępne [4]. Zaproponowano, aby siedem łopatek kierowniczych zostało wykonanych z giętej blachy o grubości 3 mm. Wyznaczono również charakterystyki teoretyczne zaprojektowanego wentylatora.

Aby zweryfikować obliczenia analityczne przeprowadzono symulacje numeryczne przepływu przez zaprojektowany wentylator. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników analitycznych i numerycznych, wobec czego projekt wentylatora został zaakceptowany i przekazany do produkcji.

^{*} Mgr inż. Maciej Majcher, maciej.majcher@wat.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-4094-8766 – Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska Dr hab. inż. Stanisław Wrzesień, stanisław.wrzesien@wat.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-4543-1256 – Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska

Dr inż. Michał Frant, michal.frant@wat.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-1372-9242 - Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska

Metodyka analiz numerycznych

Numeryczną analizę przepływu przez wieńce łopatkowe wentylatora przeprowadzono w oprogramowaniu Ansys Fluent z zaimplementowanymi metodami komputerowej mechaniki płynów. Symulacje numeryczne przeprowadzono z użyciem uśrednionych równań Naviera–Stokesa, określanych jako Reynolds Averaged Navier–Stokes (RANS) [6].

Układ równań RANS nie jest zamknięty i do jego domknięcia należy dopisać komplet równań określających składowe tensora naprężeń turbulentnych [6]. Równania te, w przypadku komputerowej mechaniki płynów, wynikają z zastosowanego modelu turbulencji. W niniejszej pracy wykorzystano model typu *realizable* k- ε .

Wynikiem serii analiz numerycznych były następujące charakterystyki wentylatora osiowego:

• przebieg ciśnienia całkowitego w funkcji objętościowego wydatku przepływu: $\Delta p_c = f(Q)$,

• przebieg sprawności całkowitej w funkcji objętościowego natężenia przepływu: $\eta = f(Q)$,

• przebieg mocy w funkcji objętościowego natężenia przepływu: P = f(Q).

Odtworzenie geometrii wieńca wirnikowego

Rzeczywisty wentylator osiowy wyprodukowano na podstawie danych z projektu analitycznego. W celu weryfikacji poprawności wykonania odtworzono geometrię finalnego wieńca wirnikowego z zastosowaniem inżynierii odwrotnej – skanowania optycznego. Rzeczywisty wieniec wirnikowy wentylatora zeskanowano skanerem optycznym GOM ATOS 2. Jego działanie polega na analizie linii w serii obrazów prążków rzutowanych na powierzchnię skanowanego obiektu. Prążki są rejestrowane przez kamerę urządzenia i przetwarzane za pomocą algorytmów dostosowanych do parametrów układu optycznego [3]. W efekcie powstaje chmura punktów o współrzędnych *x*, *y*, *z*.

Na podstawie uzyskanej chmury punktów, za pomocą specjalizowanego oprogramowania dołączonego do skanera, wyeksportowano zeskanowaną geometrię w postaci pliku .st/ na potrzeby dalszego procesu odtwarzania geometrii. Ostateczną geometrię wieńca wirnikowego uzyskano z wykorzystaniem oprogramowania Siemens NX 8.5. Efektem tych operacji była wirtualna bryła wieńca wirnikowego, którą porównano z geometrią wieńca wirnikowego wynikającą z projektu analitycznego.

Na rys. 2 porównano geometrię wyprodukowanego wieńca wirnikowego (kolor czerwony) z geometrią wynikającą z projektu analitycznego (kolor zielony). Jak widać geometria rzeczywistego wieńca odbiega od geometrii wyznaczonej w projekcie analitycznym, a odchylenie krawędzi spływu od założeń projektowych wyniosło ok. 4 mm na wierzchołku łopatki. Różnica wynika z technologii produkcji wentylatora. Przeprowadzono więc symulacje numeryczne przepływu przez wieńce łopatkowe wyprodukowanego wentylatora, aby określić wpływ różnicy w geometriach na jego osiągi.



Rys. 2. Porównanie geometrii wyprodukowanego wieńca wirnikowego (czerwony) i geometrii wynikającej z jego projektu analitycznego

Porównanie wyników symulacji numerycznej z wynikami doświadczalnymi i analitycznymi

Przeanalizowano podstawowe charakterystyki pracy wentylatora w funkcji objętościowego natężenia przepływu uzyskane eksperymentalnie i numerycznie. Symulacje przepływu przez zaprojektowany wentylator wykonano dla układu wieniec wirnikowy–wieniec kierownic. Wykorzystano model MRF (Multiple Reference Frame), pozwalający na wykorzystanie periodycznych warunków brzegowych, oraz model Mixing Plane [1]. Model Mixing Plane umożliwia przeprowadzenie analiz numerycznych dla przypadku przepływu ustalonego w maszynach wirnikowych, w których liczba łopatek wirnikowych nie stanowi całkowitej wielokrotności liczby łopatek kierowniczych i odwrotnie.

Na rys. 3–5 kolorem czarnym oznaczono charakterystyki uzyskane z badań doświadczalnych, a kolorem zielonym – charakterystyki uzyskane numerycznie dla geometrii wentylatora wynikającej z projektu analitycznego. Kolorem czerwonym oznaczono charakterystyki uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych zeskanowanego wieńca wirnikowego z dołączonym wieńcem kierownic, którego geometrię wyznaczono w projekcie analitycznym.

Na rys. 3 pokazano charakterystyki przyrostu ciśnienia całkowitego wentylatora osiowego wyznaczone dwoma metodami. Na podstawie przebiegów charakterystyk można stwierdzić uzyskanie zadowalającej zgodności wyników doświadczalnych i numerycznych.

Największe różnice w osiąganym sprężu wentylatora obserwuje się dla wysokich wydatków przepływu. Dla objętościowych natężeń przepływu ~10,5 ÷ ~12,75 m³/s średnia różnica względna między wynikami doświadczalnymi i numerycznymi zaprojektowanej geometrii wyniosła ok. 20%. Wraz ze spadkiem wydatku różnice między charakterystykami spadają. W całym zakresie objętościowych natężeń przepływu uzyskanych na stanowisku badawczym względna, średnia, różnica między wynikami doświadczalnymi i z symulacji numerycznej przepływu przez wieńce łopatkowe wyznaczone w projekcie analitycznym wyniosła ok. 12%.

Różnice w przyrostach ciśnienia całkowitego mogą wynikać z metody symulacji. Symulacje przeprowadzono dla jednej łopatki wirnikowej i kierowniczej z zachowaniem periodycznych warunków brzegowych – nie analizowano poprawności ustawienia łopatek w całym wieńcu. Dodatkowo podczas symulacji numerycznych nie uwzględniono chropowatości łopatek, kanału przepływowego i obecności spawów.

Różnica w wykonaniu wieńca wirnikowego (patrz rys. 2) nieznacznie wpłynęła na osiągany przyrost ciśnienia całkowitego (zwiększyła jego wartość). Średnia różnica względna, w całym zakresie wydatków, w wynikach uzyskiwanych metodą numeryczną dla skanowanej geometrii wentylatora i geometrii wynikającej z projektu analitycznego wyniosła 3%.

Na rys. 4 pokazano charakterystyki sprawności wentylatora osiowego uzyskanych eksperymentalnie i numerycznie. Widać między nimi wyraźną różnicę. Średnia względna różnica sprawności wyznaczonej doświadczalnie i numerycznie wyniosła ok. 24%. Wynika to przede wszystkim ze sposobu wyznaczania sprawności tymi dwoma metodami. Sprawność wentylatora, wyznaczona eksperymentalnie, stanowi stosunek mocy strumienia do mocy silnika elektrycznego napędzającego wieniec wirnikowy. W badaniach numerycznych w wyznaczaniu sprawności nie uwzględnia się mocy silnika, a moc strumienia odnosi się do mocy liczonej na podstawie wyznaczonego momentu



Rvs. 3. Charaktervstvki przvrostu ciśnienia w funkcji objetościowego natężenia uzyskane doświadczalnie i numerycznie



Rys. 4. Charakterystyki sprawności w funkcji objętościowego natężenia uzyskane doświadczalnie i numerycznie



Rys. 5. Charakterystyki mocy w funkcji objętościowego natężenia uzyskane doświadczalnie i numerycznie

obrotowego i zadanej prędkości obrotowej. Dodatkowo, jak wspomniano, w metodzie numerycznej nie uwzględniono chropowatości łopatek, kanału przepływowego oraz ewentualnych nieszczelności stanowiska badawczego.

Analizując charakterystyki uzyskane na podstawie symulacji numerycznej dla zeskanowanej geometrii i geometrii wynikającej z projektu analitycznego nie stwierdzono istotnego wpływu rozbieżności w odwzorowaniu łopatki wirnikowej na jej sprawność. Średnia różnica względna w osiąganych sprawnościach wyniosła ~1% w całym zakresie objętościowych natężeń przepływu uzyskanych w symulacjach numerycznych.

Na rys. 5 pokazano charakterystyki mocy wentylatora osiowego wyznaczone dwoma metodami. W zakresie średnich wydatków przepływu, tj. ~8 ÷ ~11 m3/s, uzyskano zadowalającą zgodność między wynikami doświadczalnymi i numerycznymi. Średnia, względna różnica w mocy, wyznaczonej eksperymentalnie i numerycznie, wyniosła ok. 4%.

W zakresie wysokich i niskich wydatków przepływu różnice w przebiegach charakterystyk są wyraźne. W zakresie objętościowych natężeń przepływu ~11,5 ÷ ~12,75 m³/s średnia, względna różnica mocy wynosi ok. 14%, natomiast w zakresie wydatków ~7 ÷ ~8 m3/s różnica ta wynosi ok. 8%. Rozbieżności wynikają przede wszystkim z wcześniej wymienionych sposobów wyznaczania mocy dwoma metodami.

Należy stwierdzić, że odchylenie geometrii rzeczywistego wieńca wirnikowego od geometrii wynikającej z projektu analitycznego niewiele wpłynęło na charakterystykę mocy. Średnia, względna różnica w charakterystykach uzyskanych numerycznie dla wentylatora skanowanego i geometrii wyznaczonej analitycznie w całym zakresie rozpatrywanych wydatków przepływu wynosi ok. 2%.

Podsumowanie

Porównano podstawowe charakterystyki zaprojektowanego wentylatora osiowego uzyskane doświadczalnie oraz numerycznie. Geometrię wyprodukowanego wieńca wirnikowego odtworzono jedną z metod inżynierii odwrotnej i porównano z geometrią wynikającą ze zrealizowanego projektu analitycznego. Stwierdzono odchylenie geometrii rzeczywistego wieńca od geometrii wynikającej z obliczeń analitycznych. Symulacje numeryczne przepływu przez wieńce łopatkowe wentylatora i ich wyniki porównano z danymi doświadczalnymi.

Uzyskano zadowalającą zgodność wyników charakterystyki przyrostu ciśnienia całkowitego. Charakterystyki sprawności uzyskane dwoma metodami badawczymi zdecydowanie się różnią, co wynika z różnic wyznaczania sprawności na podstawie wyników symulacji numerycznej oraz z nieuwzględnienia w metodzie numerycznej chropowatości łopatek i kanału przepływowego. W przypadku charakterystyki mocy uzyskano zadowalającą zgodność wyników w zakresie średnich wydatków przepływu. Nie stwierdzono istotnego wpływu odchylenia geometrii rzeczywistego wieńca wirnikowego od geometrii wyznaczonej w projekcie analitycznym na osiągi wentylatora.

Można wnioskować, iż odpowiednio zastosowany schemat projektowania wentylatorów osiowych, oparty na metodach analitycznych, numerycznych i doświadczalnych, pozwala na uzyskanie zakładanych osiągów tego typu maszyn.

LITERATURA

- ANSYS Fluent. 2013. "Theory Guide. Release 15.0". ANSYS. Release 15. "Meshing User's Guide". Dziubek T., Oleksy M. "Zastosowanie systemu optycznego ATOS II [3] w technikach szybkiego prototypowania modeli kół zębatych otrzymywanych na bazie żywicy epoksydowej". Polimery. 62, 1 (2017): 44-51
- [4] Emery J., Herrig J., Erwin J., Felix R. "Systematic two-dimensional cascade tests of NACA 65-series compressor blades at low speed". NACA Technical Report. 1368. USA: National Advisory Committee for Aeronautics. Langley Aeronautical Lab, 1958. [5] Junger C., Zenger F., Reppenhagen A., Kaltenbacher M., Becker S.
- Numerical Simulation of a Benchmark Case for Aerodynamics and Aeroacoustics of a Low Pressure Axial Fan". 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Inter Noise. Hamburg, 2016.
- [6] Kazimierski Z. "Podstawy mechaniki płynów i metod komputerowej sy-mulacji przepływu". Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2004.
- [7] Kuczewski S. "Wentylatory". Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1978.
- O'Halloran S., Hannukainen P., Makkonen P., Meyer L., Kumar V., Krosser M. "Fan Modeling Validation Using CFD". Summary of Pro-ceedings. NAFEMS World Congress. USA, 2015.
- [9] Rościszewski J. "Aerodynamika stosowana". Warszawa: Wydawnictwo MON, 1957.
- [10] Tuliszka E. "Sprężarki, dmuchawy i wentylatory". Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1976.
- [11] Witkowski A. "Sprężarki wirnikowe. Teoria, konstrukcja, eksploata-cja". Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- [12] Wrzesień S., Frant M., Majcher M. "Numeryczna analiza charakte-rystyk wentylatora osiowego". *Mechanik*. 7 (2018): 606–608, https:// doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.98.
- [13] Younsi M., Lavedrine J. "Unsteady Flow and Acoustic Behaviour of an Axial Fan: Numerical and Experimental Investigations". Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC11. Spain, 2015.