

Prof.dr hab.inż. Janusz Kotowicz
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska
Ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
e-mail: janusz.kotowicz@polsl.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Odyjasa
pt. „ Ocena wpływu wybranych parametrów geometrycznych wentylatora
promieniowego z nową metodą regulacji na jego charakterystykę”

A. Wprowadzenie

W wielu gałęziach przemysłu stosowane są szeroko wentylatory, w tym także promieniowe. Szacuje się, że w Europie wentylatory są trzecią grupą urządzeń stosowanych w przemyśle, o największym zużyciu energii wynoszącym około 200TWh/ rok i wciąż rosnącym. Konstrukcja i produkcja wentylatorów także dzięki zaangażowaniu nauki jest na dobrym poziomie, ich sprawność dla jednostek dużej mocy przekracza w punkcie nominalnym 90%. Jej podniesienie wymaga doskonalenia układu przepływowego oraz wprowadzania nowych materiałów. Charakterystyki pracy wentylatora (w tym sprawność) pogarszają się wraz z przesunięciem punktu pracy, będącym wynikiem zmian zachodzących w procesach przemysłowych (oporów instalacji). Niezwykle istotnym staje się więc dobór takiej metody regulacji pracy wentylatora, która zapewni jego wysoką efektywność w zmienionych warunkach eksploatacyjnych. Uwzględniając to,

tematykę pracy należy uznać za ważną zarówno z poznawczego jak i użytecznego charakteru prac naukowo-badawczych.

B. Zakres rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Piotra Odyjasa zawiera łącznie 298 stron, na które składa się z 9 merytorycznych rozdziałów, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, wykaz oznaczeń, bibliografia, załączniki A,B,C,D (łącznie 103 strony).

W recenzowanej rozprawie zasadniczo można wyróżnić działania w 3 obszarach:

- teoretyczno-analitycznym
- badań numerycznych (CFD)
- badań eksperymentalnych

Pierwsze dwa rozdziały to motywacja do podjęcia tematu i wstęp. Autor podkreśla tu zmianę charakterystyk pracy wentylatora wraz ze zmianą warunków jego pracy. Nawet bardzo dobrze zaprojektowany i wykonany wentylator jest nieefektywny w niekorzystnych, odbiegających od nominalnych warunkach eksploatacji poza optymalnymi zakresami charakterystyk. Sytuację można poprawić opracowaniem efektywnych metod regulacji, zapewniających wysoką sprawność energetyczną i obniżenie obciążenia środowiska.

Rozdział 3 dedykowany jest omówieniu dotychczas stosowanych metod regulacji wentylatorów ze szczególnym uwzględnieniem metod polegających na zmianie geometrii wentylatora. Autor analizuje tutaj następujące metody regulacji:

- poprzez zastosowanie dławienia
- poprzez zmianę prędkości obrotowej wirnika
- poprzez zmianę geometrii wentylatora lub wirnika (wstępne zawinięcie, zmianę kąta spływu z łopatki, zmianę szerokości wirnika, zmianę średnicy

wirnika, zmianę współczynnika wypełnienia wieńca - lub połącznie kilku wymienionych).

W podsumowaniu tego rozdziału mgr inż. Piotr Odyjas proponuje nową metodę regulacji. Przedstawia ją szczegółowiej w punkcie 5 wraz z rysunkiem. Polega ona na zmianie długości łopatki (średnicy zewnętrznej wirnika) podczas ruchu (lub postoju) ale bez konieczności wymiany wirnika lub końcówki łopatki (kąt spływu z łopatki może się zmieniać lub nie). Rozwiązanie zostało opatentowane (patent nr 234339, 28.02.2020) - mgr inż. Piotr Odyjas jest jednym (z 6) współautorów. W rozdziale 4 Autor formułuje następujące cele pracy:

- 1) Zaproponowanie nowej metody regulacji, która będzie stanowiła rozszerzenie dotychczas opracowanych, oraz określenie jej możliwości.
- 2) Opracowanie modelu matematycznego w postaci wzorów do opisu proponowanego sposobu regulacji z uwzględnieniem zmiany średnicy wirnika oraz ewentualnego wpływu szerokości wirnika jak i kąta spływu z łopatki.
- 3) Weryfikacja i walidacja zaproponowanego modelu matematycznego wybranych wielkości wentylatorów promieniowych i porównanie wyników w przypadku zastosowania wzorów znanych z literatury.

W rozdziale 6 mgr inż. Piotr Odyjas wyprowadza zależności (równania) pozwalające określić charakterystyki wentylatora po zastosowaniu zaproponowanej przez siebie metody regulacji. W szczególności najpierw wyprowadza wzór (31) do przeliczenia objętościowego natężenia przepływu oraz spiętrzania (43), a następnie mocy (6) i sprawności. Przeprowadzona wstępna ocena wyprowadzonych wzorów nie daje jednoznacznej odpowiedzi na pytanie jaka postać tych wzorów (31,43) pozwala uzyskać wyniki najbliższe rzeczywistym. Dlatego przeprowadzono obliczenia CFD i badania eksperymentalne (rozdział 7). Obliczenia numeryczne (rozdział 7.1)

przeprowadzono z wykorzystaniem metody objętości skończonych, w szczególności metod $k-\omega$ SST i $k-\epsilon$ Relizable. Wyznaczono wartości wskaźnika modelu dyskretnego oraz błędy dla obydwu wymienionych modeli. Określono przebiegi zmienności wybranych parametrów w funkcji liczby iteracji. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla wentylatora typu TES14 produkowanego przez firmę WLN Luftechnik GmbH. Badano 5 wirników, wirnik bazowy (LR2), wirnik ze średnicą powiększoną (LR3) i pomniejszoną (LR4) o 10%, wirnik ze średnicą pomniejszoną (LR5) i powiększoną (LR6) o 20%. Wyniki obliczeń numerycznych porównano z wynikami badań eksperymentalnych (dotyczyły to wirników LR2, LR3, LR4) – zgodność była dobra, na ogół różnice nie przekraczały 5%. Wspomniane badania eksperymentalne przeprowadzono na opisanym w punkcie 7.2 stanowisku badawczym. Badania eksperymentalne miały na celu określenie charakterystyk wentylatora tzn. ciśnienia całkowitego, sprawności i mocy w funkcji objętościowego natężenia przepływu, (11 punktów pracy), zgodnie z normą DIN 24163 (stanowisko powstało u producenta wentylatora). Charakterystyki zdjęto dla 3-ch różnych prędkości obrotowych wirnika.

Druga część badań eksperymentalnych (rozdział 7.3) została przeprowadzona dla wentylatora z projektu EffiFan CORNET, z układem regulacji, który jest przedmiotem opiniowanej rozprawy (przedstawionym wstępnie w rozdziale 5). Autor przedstawia tu model geometryczny prototypu tego wentylatora z ciągnowym układem regulacji długości łopatki, zapewniający płynną zmianę punktu pracy także podczas biegu wentylatora. Zdjęto zestawy 5 charakterystyk wentylatora przy różnych wysuwach ruchomej części łopatki (0%, 25%, 50%, 75%, 100%). Szczegółowe wyniki pomiarów i obliczeń, w tym także cały rachunek błędów mgr inż. Piotr Odyjas przedstawił w załączniku C. Weryfikację numeryczną badań stanowiskowych z rozdziału 7.3 Autor przeprowadził w rozdziale 7.4 – dotyczyły one przypadku maksymalnie wysuniętej ruchomej części łopatki (100%). Autor poszukuje przyczyny różnicy

między spiętrzeniem wyznaczonym numerycznie i eksperymentalnie, to samo dotyczy mocy na wale i sprawności. Za stratę ciśnienia odpowiada szczelina między ruchomą a stałą częścią łopatki wirnika (za różnice w mocy i sprawności może odpowiadać sprawność silnika wraz z przemiennikiem częstotliwości). Mimo wszystkich różnic mgr inż. Piotr Odyjas uznaje opracowane modele numeryczne za zwalidowane. Walidację zaproponowanego w rozdziale 6 modelu matematycznego [tj. zależności głównie (31) i (43) ale także (13), (15) i (16)] przy przeliczeniu charakterystyki wentylatora mgr inż. Piotr Odyjas przedstawia w rozdziale 8. Analizuje zarówno wentylator TES14-200 jak i wentylator z projektu CORNET EffiFAN. Przedstawia wyniki obliczeń oraz analiz przy przeliczaniu spiętrzenia całkowitego wentylatora oraz natężenia przepływu w zależności od wykorzystania wymienionych wzorów (np. dysponując charakterystykami z badań eksperymentalnych lub numerycznych) wirnika o średnicy bazowej LR2, przelicza je na charakterystyki wirników o innych średnicach – LR3 ÷ LR6). Wyniki przeliczenia porównywane są z wynikami uzyskanymi z badań eksperymentalnych lub numerycznych i wybierany jest wzór z pięciu wyżej wymienionych, dający największą dokładność (najmniejsze odchylenie). Szczegółowe wyniki (tabele i wykresy) do tego rozdziału zawarto w obszernym 45-stronicowym załączniku D.

Pracę kończy rozdział 9 „Podsumowanie i wnioski”. Zawiera ona szereg szczegółowych wniosków i elementy syntetycznego podsumowania, jak również wskazano tam dalsze kierunki badań.

Bibliografia pracy zawiera łącznie 149 pozycji. Cztery załączniki A,B,C,D zawierają łącznie 103 strony. W pierwszym A przedstawiono analizy istotności składników wzoru (43) wykonaną na podstawie wyników badań Bommesa i własnych (TES-14). W załączniku B i C pokazano wyniki pomiarów i obliczeń w tym szczegółowo rachunek błędów dla wentylatora TES14 (załącznik B) i wentylatora z projektu CORNET (załącznik C).

C. Ocena rozprawy

1. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest ważna i interesująca. Praca jest napisana w większości przejrzysto i podzielona na logiczne, wynikające z układu pracy rozdziały.
2. Autor w pracy w oparciu o rozwiązanie patentowe (którego jest jednym z 6 współautorów) zaproponował i opisał nową metodę regulacji pracy wentylatora promieniowego. Ogólnie rzecz biorąc, polega ona na zmianie długości łopatki wirnika, co powoduje zmianę średnicy zewnętrznej wirnika i ewentualną zmianę kąta spływu z łopatki. W konsekwencji zmieniają się charakterystyki pracy wentylatora.
3. Aby móc te nowe charakterystyki wyznaczyć (bez pomiarów eksperymentalnych czy obliczeń numerycznych) mgr inż. Piotr Odyjas wyprowadził równania analityczne do przeliczenia głównie spiętrzania oraz objętościowego natężenia przepływu wentylatora (jak i sprawności i mocy) w nowym ustawieniu wirnika. Pierwszą weryfikację wyprowadzonych równań przeprowadził Autor wykorzystując dane literaturowe.
4. Na potrzeby pracy mgr inż. Piotr Odyjas wykonał badania stanowiskowe eksperymentalne dla wyznaczenia charakterystyk pracy 2 typów wentylatorów:
 - a) TES 14-200 (dla 3-ch różnych wirników o różnych średnicach, długości łopatki i kącie spływu)
 - b) z projektu EffiFan CORNET wyposażonego w układ regulacji przedstawiony wyżej w punkcie 2.Szczegółowo pokazał tabele z wynikami pomiarów oraz obliczeń wraz z rachunkiem błędów, w tym wszystkie wzory wykorzystane tutaj zgodnie ze stosowną normą ISO.
5. Dla w/w (w punkcie 4) wentylatorów Autor wykonał obliczenia numeryczne CFD wykorzystując oprogramowanie Ansys Fluent, bazujące

na metodzie objętości skończonych. Badał różne modele turbulencji k- ω (SST) czy k- ϵ Realizable, liczbę objętości skończonych, parametru y^+ siatki, liczby iteracji – na uzyskane rezultaty obliczeń. Pozwoliło to wyznaczyć charakterystyki badanych wentylatorów .

6. Rezultaty obliczeń charakterystyki wentylatora z w/w punktu 4 i 5 pozwoliły na walidowanie wyprowadzonych równań w w/w punkcie 3. Zaproponowane do obliczenia natężenia przepływu oraz spiętrzenia wzory (31 i 43) w pełnej postaci lub z uwzględnieniem części członów, dają dobrą dokładność przeliczenia charakterystyk wentylatora, na ogół nie gorszą niż wzory literaturowe. Mogą być więc przydatne w praktyce projektowo-konstrukcyjnej.
7. Przedstawione w pracy rozwiązanie w formie z układem regulacji podczas ruchu lub postoju, może poszerzyć zakres regulacji wentylatorów głównie dużych mocy i dlatego powinno być dyskutowane jako alternatywa możliwych rozwiązań.

D. Uwagi krytyczne i dyskusyjne i drobne

w.g – wiersz od góry strony, w.d. – wiersz od dołu strony

- *Dlaczego Autor zrezygnował z analizy wpływu zmiany średnicy, szerokości i kąta na moc oraz sprawność ograniczając się do badania wpływu wymienionych wielkości na charakterystyki spiętrzenia.*
- *Na str. 150 Autor pisze: Analiza wyników uzyskanych na podstawie: badań stanowiskowych pozwoliła stwierdzić, że przy maksymalnym wysuwie ruchomej części łopatki, różnica wartości spiętrzenia i natężenia przepływu zmienia się w zakresie ok. 5%. Proszę to wyjaśnić, z tabeli 29 odczytać można inne wartości. Jak to się ma do uwagi ze str. 149, 3 w.g. – „Zmiana długości łopatki (o 25% długości jej części ruchomej) skutkuje*

przesunięciem charakterystyki o ok. 10% wartości spiętrzenia oraz natężenia przepływu (wydaje się, że uwaga 1-sza dotyczy różnicy pomiędzy 75% a 100% wysuwu ruchomej części łopatki - ?)

- *Str 4; 5 w.d.* *Jest „opracowaniu modelowi”, powinno być „opracowaniu modelu”*
- *Str. 11; 14 w.g.* *Jest „wentylatorów osiowych o miejscowego”, powinno być „wentylatorów osiowych do miejscowego”*
- *W tabeli 1, str. 26 prędkość obrotową oznaczono przez N, wcześniej oznaczono n*
- *Str. 27; 11 w.g* *Jest „prof. Zawilaka”, powinno być „prof. Zawiślaka”*
- *Str. 29; 10 w.g.* *Jest „jak widać z równań (1) i (2)”, powinno być „jak widać z równań (8) i (9)”*
- *Str. 192, poz. [95]* *Jest „łopatek wiernika”, powinno być „łopatek wirnika”*
- *Str. 35 i 36* *Raz jest A. Podśętkowski, drugim razem A. Pordsędkowski, proszę to ujednoczyć*
- *Str. 46, nad rys. 29* *„w efekcie na efektywność tego” – niezgrabny zapis jest:*
- *Str. 50; 3 w.d.* *Jest „poprawę sprawności statycznej z 0,761 na 0,734 [5] – to jest pogorszenie*
- *Str. 55; tab. 2* *- jest w niej oszczędność energii wyrażona błędnie w kW (to jest jednostka mocy)*

- *Str. 57; 11 w.g.* *Jest „wzór (10), - chodzi o wzór (11)*

- *Str. 68; 1 w.d.* *Jest „Równanie (38) należy zapisać” powinno być
 „Równanie (37) należy zapisać”*

- *Str. 69* *W mianowniku wzoru (42) jest $\eta_{P,M}$ powinno być η_P*

- *Str. 76; 7 w.d.* *Jest „ograniczania liczny”, powinno być
 „ograniczenia liczby”*

- *Str. 85; 9 w.d.* *Jest „niż wentylator bazowo zaprojektowanym”,
 powinno być „niż wentylator bazowo
 zaprojektowany”*

- *Str. 105* *W tabeli 11 jest „k-e Realizable”, powinno być „k-ε
 Relizable”, ta sama uwaga dotyczy tabeli 12
 ze str. 108*

- *Str. 120-123, rys.* *Brak w tekście odniesienia do tych rysunków
 75-78*

- *Str. 127; 1 w.d.* *Jest ”mierzone ciśnienie różnicowego”, powinno
 być „mierzone ciśnienie różnicowe”*

- *Str. 128, 6 w.g.* *Jest ‘koniczna była”, powinno być „konieczna
 była”*

- *Str. 137; rys. 90* *Moc na wale błędnie oznaczono w [Pa] zamiast w
 [kW], podobnie sprawność oznaczono w [Pa]
 zamiast [-].*

- *Str. 158; 11 w.g.* *Jest „128 pa”, powinno być „128 Pa”*

- Str. 168; 12 w.g. Jest „rozdzielenie ma jest zasadne”, powinno być „rozdzielenie jest zasadne”
- Str. 177; 4 w.d. Jest „należy zadać pytani”, powinno być „należy zadać pytanie”
- Str. 179; 7 w.g. Jest „w Tab. 3 podano poprzez wady i zalety”, powinno być „w Tab. 3 podano wady i zalety”

E. WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Odyjasa pt. „ *Ocena wpływu wybranych parametrów geometrycznych wentylatora promieniowego z nową metodą regulacji na jego charakterystykę*” zawiera sformułowanie ważnych w dyscyplinie: budowa i eksploatacja maszyn (inżynieria mechaniczna) zadań badawczych, ich rozwiązanie i dyskusję wyników.

W opinii końcowej chcę także podkreślić złożoność badanych problemów i związaną z tym konieczność przeprowadzenia żmudnych oraz pracochłonnych modeli, obliczeń i pomiarów. Autor w ich przeprowadzeniu wykazał się bardzo dobrą wiedzą i szeroką skalą umiejętności posługiwania się złożonymi technikami modelowania, obliczeń i pomiarów eksperymentalnych, jak i umiejętnościami opracowania i interpretacji wyników oraz szerokiej ich dyskusji.

Poziom merytoryczny rozprawy tworzy logicznie przemyślaną i spójną całość potwierdzającą dojrzałość Doktoranta do prowadzenia badań naukowych, w tym także z zakresie samodzielności i pracowitości.

Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Piotra Odyjasa w pełni spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach i zasługuje na pozytywną opinię. Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Trzeba także podkreślić szeroki obszar wiedzy i umiejętności opanowany przez Doktoranta a obejmujący:

- a) Zagadnienia konstrukcyjne*
- b) Opracowanie i badanie analitycznych modeli matematycznych*
- c) Przeprowadzenie obliczeń numerycznych z wykorzystaniem CFD*
- d) Przeprowadzenie badań eksperymentalnych, opracowanie wyników pomiarów i analizę błędów*

Uwzględniając ponadto, że praca zawiera interesujące i poszerzające wiedzę rozwiązania przedstawione szczególnie powyżej w ocenie rozprawy w punktach 2 i 6, proszę o rozważenia wyróżnienia.

Gliwice, 30.09.2023r.

Janusz Kotowicz

