

BADANIE CHARAKTERYSTYK PRZEPLYWOWYCH WENTYLATORA PROMIENIOWEGO

Andrzej MROWIEC¹, Marcin HERONIMCZAK²

1. Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu, Wydział Politechniczny
tel.: 606 942 976 e-mail: a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl
2. tel.: 607 420 904 e-mail: marcin.heronimczak@gmail.com

Streszczenie: W artykule przedstawiono zaprojektowane i zbudowane stanowisko pomiarowo-odbiorcze, przeznaczone do odbioru produkowanych seryjnie wentylatorów promieniowych (odśrodkowych z łopatkami odgiętymi do tyłu) stosowanych w układach wyciągowych powietrza zanieczyszczonego pyłami. Przedstawiono również, wykonanie wirtualnego stanowiska pomiarowego w oprogramowaniu SolidWorks. Na stanowisku tym, przeprowadzono dla badanego wentylatora promieniowego symulacje numeryczne w programie Flow Simulation. Otrzymane z symulacji numerycznych wyniki, porównano z wynikami uzyskanymi w badaniach odbiorczych wentylatora promieniowego, które przedstawiono w postaci wykresów charakterystyk przepływowych. Wyznaczono również złożoną niepewność rozszerzoną typu B, pomiaru statycznego ciśnienia spiętrzenia na badanym wentylatorze.

Słowa kluczowe: wentylator promieniowy, kryza pomiarowa, krzywe spiętrzenia, niepewność pomiaru, symulacja numeryczna.

1. WSTĘP

Wentylatory należą do grupy maszyn przepływowych, w których wskutek dynamicznego oddziaływania z nieruchomymi i wirującymi elementami, przepływające medium gazowe zwiększa lub zmniejsza swój potencjał energetyczny. W rodzinie maszyn przepływowych zaliczamy je do maszyn roboczych wirnikowych [1, 2].

Wentylatory charakteryzują się wytwarzaniem przyrostów ciśnienia statycznego o różnej wartości, które w funkcji strumienia objętości tworzą charakterystyki, będące wykresami zależności ciśnienia spiętrzenia od strumienia objętości przepływającego medium (głównie powietrza), nazywane często w literaturze krzywymi dławienia.

W zależności od wielkości wytwarzanego przyrostu ciśnienia statycznego (spiętrzenia statycznego) wentylatory można podzielić na [3]: niskoprężne (ciśnienie spiętrzenia do 720 Pa), średnioprężne (ciśnienie spiętrzenia od 720 Pa do 3600 Pa), wysokoprężne (o ciśnieniu spiętrzenia powyżej 3600 Pa).

Innym, bardzo ważnym kryterium podziału wentylatorów jest kierunek przepływu czynnika przez wirnik, z tego względu wentylatory dzielimy na: osiowe, promieniowe (odśrodkowe) oraz mieszane.

W wentylatorach promieniowych medium gazowe zasysane jest osiowo na wieniec łopatkowy wirnika, a z niego tłoczone już promieniowo. Wentylatory osiowe zaś

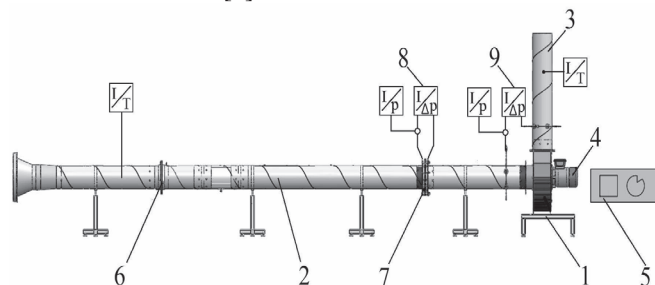
zasysają i tłoczą medium tylko w kierunku osiowym maszyny przepływowej.

W grupie wentylatorów promieniowych można wyodrębnić trzy ich rodzaje różniące się budową wirnika. Występują tutaj wirniki z łopatkami odgiętymi do przodu (w kierunku obrotu wirnika), z łopatkami prostymi (promieniowymi) lub z łopatkami odgiętymi do tyłu (przeciwnie do kierunku obrotu). Od wykonanej konstrukcji wirnika wentylatora promieniowego, zależy kształt krzywej przepływowej charakterystyki tego wentylatora [4].

Jedną z wielu zalet wentylatorów promieniowych z prostymi, czy zagiętymi do tyłu łopatkami, jest prostota konstrukcji i wykonania, oraz to, że łopatki wirnika wykonuje się głównie z typowej stali konstrukcyjnej, co umożliwia ich szybka naprawę w warunkach przemysłowych. Z tego względu stosuje się je przeważnie w instalacjach wyciągowych przy odpylaniu gazów: głównie przemysłowych lub innych silnie zanieczyszczonych pyłami różnego pochodzenia.

2. STANOWISKO POMIAROWE

Dla produkowanego wentylatora promieniowego, zaprojektowano i wykonano stanowisko pomiarowo-odbiorcze (rys. 1), jako układ pomiarowy otwarty umożliwiający swobodny przepływ powietrza przy pracy wentylatora. Zarówno projekt jak i wykonanie tego stanowiska zgodne są z obowiązującą normą PN-ISO 5801:2008 [5].



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowo - odbiorczego

Zaprojektowane stanowisko badawcze zaliczane jest wg normy do typu C i charakteryzuje się funkcją „badany wlot i swobodny wyrzut”. Rurociąg pomiarowo-przepływowy powietrza (wlotowy i wylotowy)

zaprojektowano i wykonano z rur stalowych związanych o średnicy wewnętrznej $D = 160$ mm i długość części ssawnej równej $26D$. Wykonane stanowisko pomiarowo-odbiorcze składa się z badanego wentylatora promieniowego (1) oraz układu rurociągów: ssawnego (2) i tłocznego (3) oraz armatury i przyrządów pomiarowych. Wentylator napędzany jest silnikiem trójfazowym (4), zabezpieczonym bezpiecznikiem nadmiarowo-prądowym. Każde uruchomienie wentylatora i ustawienie odpowiedniej prędkości obrotowej wirnika odbywa się płynnie przy użyciu falownika (5). Obracający się wirnik promieniowy wewnątrz wentylatora wytwarza siłę odśrodkową, na skutek której cząsteczki gazu przemieszczają się prostopadle do kierunku obrotu osi wirnika. Wskutek tego powstaje podciśnienie w rurociągu pomiarowym (2) i nadciśnienie w odcinku tłocznym instalacji pomiarowej (3), a powstająca przy tym różnica ciśnień między wlotem i wylotem wentylatora nazywana jest „sprężem”. Do zmiany charakterystyki pneumatycznej przewodu ssawnego w instalacji przepływowej wykorzystano wielostopniową przepustnicę osiową typu IRIS DN 160 (6). Regulujemy nią płynnie przepływający strumień objętości powietrza. Zmieniając pozycję suwaka na skali zamknięcia przepustnicy od zera do maksimum, zmieniamy otwarcie przesłony i dławimy przepływ powietrza w rurociągu wlotowym do wentylatora.

W celu wyeliminowania zawirowań i wyprostowania strugi powietrza przed kryzą pomiaru strumienia objętości, zastosowano prostownicę strugi (stabilizator strugi), wykonaną zgodnie z normą [6].

Dla wyznaczenia strumienia objętości przepływającego powietrza, w rurociągu wlotowym (ssawnym) zamontowano kryzę pomiarową ISA (7), która wraz z podłączonym do niej elektronicznym manometrem różnicowym (8) tworzy zespół przepływomierza zwężkowego. Wymiary geometryczne kryzy pomiarowej wyznaczono za pomocą programu TNflow 3.10 – „Obliczenia zwęzek pomiarowych wg PN-EN ISO 5167:2005”. Pomiar wartości ciśnienia spiętrzenia Δp_k przed i za tarczą kryzy pomiarowej ISA mierzono w szczelinach przytarczowych wykonanych w kołnierzach obudowy kryzy. Ten sposób pomiaru pozwala na uśrednianie mierzonych ciśnień w przekrojach pomiarowych i dodatkowo niweluje niewielkie błędy osiowości rurociągu mogące powstać przy montażu. Pomiaru tego dokonywano przetwornikiem różnicy ciśnień typu APR-2000G (8) z ustawionym zakresem pomiarowym 0...0,96 kPa.

Do pomiaru całkowitego sprężu statycznego Δp_w na wentylatorze (pomiar różnicy ciśnień między króćcem ssawnym i tłocznym), zastosowano przetwornik różnicy ciśnień typu APR-2000G (9) z ustawionym zakresem pomiarowym 0...1,28 kPa. Zainstalowane w kanale wlotowym przetworniki ciśnienia (10) i (11) służą do pomiaru wartości podciśnienia odpowiednio w miejscu pomiaru strumienia wydajności jak i na wlocie do wentylatora. Uzupełnieniem aparatury kontrolno-pomiarowej są dwa termometry elektroniczne, każdy z wyświetlaczem cyfrowym do pomiaru temperatury powietrza przed i za wentylatorem. Podczas wyznaczania charakterystyk wentylatora na stanowisku pomiarowym mierzono ciśnienie barometryczne oraz wilgotność powietrza, jako dodatkowe dane niezbędne do wyznaczenia rzeczywistego strumienia objętości q_v czynnika gazowego.

3. BADANIA WENTYLATORA

Badania doświadczalne wentylatora promieniowego przeprowadzono na stanowisku pomiarowym (rys. 1), na którym wyznaczono strumień objętości q_v [m³/s] wytworzony przez ten wentylator zgodnie z normą [6].

Strumień objętości przepływającego powietrza q_v w kanale wlotowym (ssawnym) badanego wentylatora obliczano wg zależności (1):

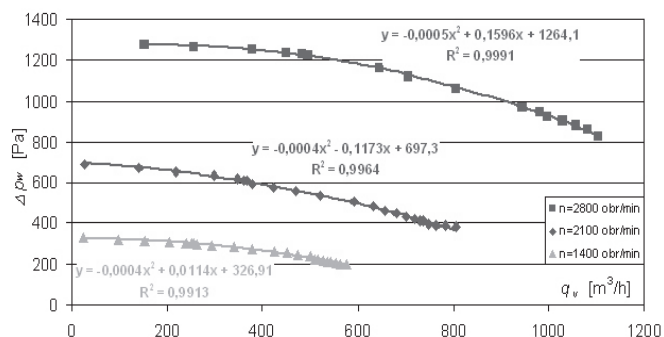
$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_k}{\rho}} \quad (1)$$

gdzie:

- C - współczynnik przepływu – wyznaczono wg PN-EN ISO 5167:2005
- β - przewężenie kryzy ($\beta = d/D$),
- ε - współczynnik ekspansji – wyznaczono wg PN-EN ISO 5167:2005
- d - średnica otworu kryzy [m],
- ρ - gęstość przepływającego medium [kg/m³],
- Δp_k - różnica ciśnień przed i za kryzą pomiarową [Pa].

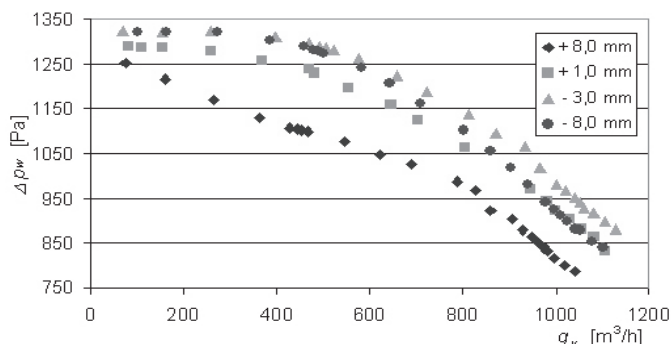
Dla tak obliczonego strumienia objętości (q_v) powietrza przepływającego przez badany wentylator wyznaczono odpowiadające mu charakterystyki pracy. Są to krzywe $\Delta p_w = f(q_v)$ wyznaczone na podstawie średnich wartości z sześciu pomiarów spiętrzenia statycznego (dla wybranych wartości strumienia). Mierzone spiętrzenie Δp_w jest różnicą ciśnień statycznych (uśrednianych w przekroju z czterech miejsc na obwodzie), mierzonych w strefie wylotowej wentylatora i wlotowej badanego wentylatora dla przyjętej stałej prędkości obrotowej wirnika (stałej wartości strumienia objętości q_v) [6].

Na rysunku 2 przedstawiono krzywe spiętrzenia ciśnienia statycznego $\Delta p_w = f(q_v)$ dla trzech wybranych prędkości obrotowych wirnika wentylatora promieniowego, stabilizowanych układem falownika.



Rys. 2. Rozkład krzywych spiętrzenia $\Delta p_s = f(q_v)$ w zależności od prędkości obrotowej wirnika

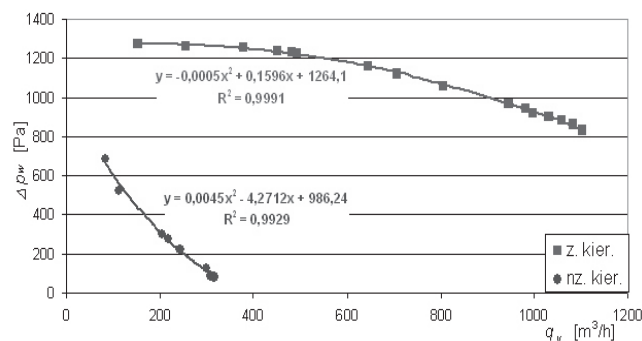
Dodatkowo, wykonano badania pozwalające ocenić wpływ wielkości szczeliny między króćcem ssawnym a tarczą wlotową wirnika (dla badanego wentylatora szczelina wynosiła +1,0 mm). W tym celu wentylator zmodyfikowano tak, by można było powiększać lub pomniejszać szczelinę aż do wartości ujemnych, tworząc w ten sposób układ zakładki (króćiec ssawny wsunięty we wlot wirnika). Na rys. 3 przedstawiono krzywe spiętrzenia $\Delta p_w = f(q_v)$ pracy wentylatora, uzyskane w trakcie badań wpływu wielkości szczeliny wlotowej do wirnika, przy obrotach silnika wynoszących $n = 2800 \pm 20$ obr./min.



Rys. 3. Wpływ szczeliny wlotowej wirnika na spiętrzenie ciśnienia wentylatora

Przeprowadzone badania wykazały, że najkorzystniejszą charakterystykę spiętrzenia ciśnienia wentylatora $\Delta p_w = f(q_v)$ uzyskano przy niewielkiej zakładce, równej -3 mm (rura ssawna jest wsunięta na 3 mm we wlot wirnika) uzyskując w tym przypadku zwiększenie spiętrzenia ciśnienia średnio o ok. 50 Pa w całym przebadanym zakresie strumienia q_v .

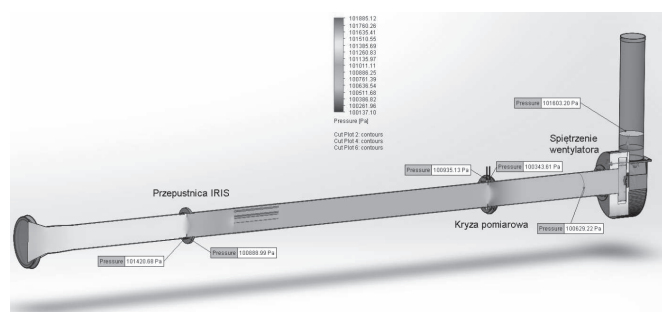
Na rys. 4 przedstawiono uzyskane w trakcie pomiarów dla obrotów silnika $n = 2800$ obr/min. charakterystyki spiętrzenia, dla kierunku wirowania wirnika zgodnym z zaleceniem producenta (krzywa „z. kier.”) jak i przeciwnym (krzywa „nz. kier.”)



Rys. 4. Wpływ kierunku obrotów wirnika na spręż wentylatora

4. BADANIA SYMULACYJNE

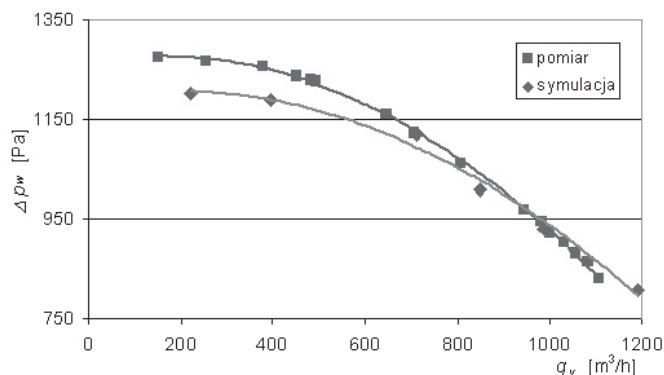
Badania symulacyjne przepływu powietrza przez układ stanowiska pomiarowo-odbiorczego (rys. 1) wykonano w celu numerycznego wyznaczenia charakterystyk przepływowych badanego wentylatora promieniowego. Przeprowadzono je w program SolidWorks Flow Simulation stosowanym w procesach projektowania maszyn przepływowych i ich symulacji numerycznych [7]. Do realizacji tego zadania zbudowano wirtualne stanowisko pomiarowe wraz z „badanym” wentylatorem (rys. 5).



Rys. 5. Wirtualne stanowisko pomiarowe

Strumień wydajności wirtualnego wentylatora obliczano wg zależności (1) wykorzystując uzyskane w trakcie badań numerycznych wartości ciśnień statycznych przed i za kryzą pomiarową (rys. 5) tzn. w miejscach poboru ciśnienia.

Otrzymane w trakcie badań numerycznych (symulacji) wartości ciśnień statycznych spiętrzenia wentylatora (sprężu Δp_w) poddano dalszej analizie i porównano z wynikami uzyskanymi podczas badań doświadczalnych, a rezultaty tego porównania przedstawiono na rys. 7.



Rys. 6. Porównanie wyników badań doświadczalnych sprężu wentylatora $\Delta p_w = f(q_v)$ z wynikami badań numerycznych (symulacji)

5. WYZNACZENIE NIEPEWNOŚCI POMIARU CIŚNIENIA SPIĘTRZENIA

Oszacowanie złożonej niepewności rozszerzonej $U_{\Delta pI}$ (typu B) pomiaru ciśnienia spiętrzenia statycznego wentylatora (sprężu Δp_w), dokonano na podstawie wypadkowej niepewności rozszerzonej pomiaru ciśnienia spiętrzenia (przed i za wentylatorem) przetwornikiem różnicy ciśnień i niepewności rozszerzonej pomiaru prądu wyjściowego z przetwornika, korzystając z zależności (2):

$$U_{\Delta pI \%} = \sqrt{U_{\Delta p \%}^2 + U_{mA \%}^2} \quad (2)$$

Do jej wyznaczenia obliczono niepewności rozszerzone uwzględniając niepewności standardowe dla przyjętego prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa błędów przyrządów pomiarowych, przyjmując współczynnik rozszerzenia $k_p = 1,645$ przy poziomie ufności $p = 0,95$. Po podstawieniu wartości, obliczono maksymalne niepewności rozszerzone mierzonych wielkości, które odpowiednio wynoszą:

- dla przetwornika różnicy ciśnień o standardowym zakresie pomiarowym 1400 Pa przy pomiarze minimalnego ciśnienia spiętrzenia $\Delta p_w = 830$ Pa,

$$U_{\Delta p \%} = 1,645 \cdot \frac{1,4}{\sqrt{3}} \cdot \frac{100 \%}{830} = 0,16 \%$$

- dla miliamperomierza SANWA PC 5000 w przypadku pomiaru minimalnego sygnału prądowego o wartości $I = 4,0$ mA:

$$U_{mA \%} = 1,645 \cdot \frac{0,04}{\sqrt{3}} \cdot \frac{100 \%}{4} = 0,95 \%$$

Z równania (2) obliczono, wartość złożonej niepewności rozszerzonej (typu B) pomiaru ciśnienia spiętrzenia statycznego wentylatora, która dla przyjętego w pracy układu pomiarowego i minimalnego ciśnienia spiętrzenia $\Delta p_w = 830$ Pa jest równa:

$$U_{\Delta p\%} = \sqrt{0,16^2 + 0,95^2} = 0,96\%$$

w zakresie mierzonych ciśnień spiętrzenia (830 ÷ 1275 Pa).

Złożoną niepewność rozszerzoną pomiaru ciśnienia spiętrzenia wyznaczono z równania (3):

$$|\Delta p_{\Delta p}| = 0,01 \cdot U_{\Delta p\%} \cdot \Delta \bar{p}_w \quad (3)$$

Jej wartość nie przekracza ± 8 Pa dla spiętrzenia ciśnienia $\Delta \bar{p}_w = 830$ Pa i ± 13 Pa dla spiętrzenia $\Delta \bar{p}_w = 1275$ Pa.

Wynik końcowy, pomiaru ciśnienia statycznego spiętrzenia wentylatora dla wyznaczonej złożonej niepewności rozszerzonej, (przy $k_p = 1,645$ i $p = 0,95$) zapisano w postaci (4):

$$\Delta p_w = (\Delta \bar{p}_w \pm \Delta p_{\Delta p}) \quad (4)$$

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na wykonanym stanowisku badawczo-odbiorczym wykonano badania wentylatora promieniowego napędzanego silnikiem trójfazowym o mocy $N = 0,55$ kW przy wybranych prędkościach obrotowych: 1400 obr/min., 2100 obr/min i 2800 obr/min.

W czasie badań wentylatora promieniowego przy obrotach znamionowych silnika ($n = 2800$ obr/min) stwierdzono że:

1. Badany wentylator należy do grupy wentylatorów średnioprężnych o ciśnieniu spiętrzenia wynoszącym $\Delta p_w = 1275$ Pa przy przepływającym strumieniu objętości $q_v = 150$ m³/h, które to spiętrzenie maleje do wartości $\Delta p_w = 830$ Pa przy przepływającym strumieniu objętości $q_v = 1100$ m³/h,
2. Standardową szczelinę między króćcem ssawnym, a tarczą wlotową wirnika, wynoszącą obecnie +1,0 mm należy zmniejszyć do -3,0 mm poprzez zastosowanie niewielkiej zakładki (wprowadzenie króćca wlotowego

do wirnika na głębokość 3,0 mm). Spowoduje to polepszenie sprężu średnio o ok. 50 Pa w całym przebadanym zakresie charakterystyki spiętrzenia,

3. Maksymalna wartość złożonej niepewności rozszerzonej pomiaru ciśnienia spiętrzenia statycznego wentylatora, dla przyjętego układu pomiarowego i minimalnego ciśnienia spiętrzenia $\Delta p_w = 830$ Pa nie przekracza 0,96%,
4. W przebadanym zakresie wartości strumienia powietrza $q_v = 150 \dots 1100$ m³/h, maksymalny błąd symulacji ciśnienia spiętrzenia na wentylatorze promieniowym nie przekracza 5,5%,
5. Należy wentylator promieniowy prawidłowo „podłączyć elektrycznie”, zgodnie z zaleceniami producenta, w przeciwnym wypadku parametry wyjściowe wentylatora (spręż i wydajność) są dużo niższe od nominalnych.

Uzyskane wyniki badań doświadczalnych i numerycznych uzasadniają celowość kontynuacji dalszych prac zmierzających do modernizacji produkowanego wentylatora jak i stanowiska pomiarowo-odbiorczego.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Kuczewski, S.; *Wentylatory*, WNT, Warszawa 1978,
2. Kuczewski, S.; *Wentylatory promieniowe*, WNT, Warszawa 1966,
3. Nantka Marian B.; *Wentylacja z elementami klimatyzacji*, Wydaw. Poli. Śląskiej, Gliwice 2015,
4. Otte, J.; *Badania wysokosprawnych wentylatorów promieniowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012,
5. PN-EN ISO 5801:2008; *Wentylatory przemysłowe - Badania charakterystyk pracy na stanowiskach znormalizowanych*, PKN, Warszawa 2008.
6. PN-EN ISO 5167-1/2:2005; *Pomiar strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym - Część 1: Zasady i wymagania ogólne, Część 2: Kryzy*, PKN, Warszawa 2005,
7. Jayapragasan C.N., Manojkumar A., Dr Janardhan Reddy K.; *Design Optimization and Parametric Study on the Alternative Blower of Travelling Cleaner*, IJSET- International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 2 Issue 4, April 2015

THE RESEARCH ON FLOW CHARACTERISTICS OF A RADIAL FAN

This article present designed, in accordance with the norm PN-ISO 5801:2008 „Industrial fans – Performance characteristic on the normalized posts” research post as a measuring open system allowing free airflow in a fan. The measuring and receiving post is rated C-type according to the norm – it is characterized by the function of „examined intake and free throw”. They were used to reception of mass-produced radial fans (centrifugal with paddles bent backwards) applied in exhaust systems of air polluted with various types of dusts. Virtual measuring post created with the use of SolidWorks software and numerical simulations made of the radial fan in Flow Simulation software were described. The results of the simulation were compared with the results obtained in acceptance test of radial fan, which were presented in a form of graphs of flow characteristics. Numerically determined simulations of pressure distribution in a flow passage of a measuring post and in the examined fan were also presented. B-type complex standard uncertainty of measurement of static backwater in the fan was also determined.

Keywords: radial fan, metering orifice, backwater curves, measurement uncertainty, numerical simulation.