

Celowość doświadczalnego wyznaczania charakterystyk wentylatorów lutniowych

Streszczenie

Omówiono charakterystyki ruchowe wentylatorów lutniowych wraz z określeniem parametrów nominalnych wentylatora oraz prawidłowej współpracy wentylatora z siecią wentylacyjną. Przedstawiono korzyści płynące z doświadczalnego wyznaczania charakterystyk i weryfikacji rzeczywistych parametrów wentylatora. Zaprezentowano możliwości badawcze ITG KOMAG w tym zakresie.

Summary

Operational characteristics of ventube fans, determination of nominal fan's parameters as well as proper cooperation of fans with the ventilation system are discussed. Benefits from experimental determination of fan's characteristics and from verification of real fan's parameters are given. KOMAG's testing infrastructure in this area is presented.

Słowa kluczowe: wentylator lutniowy, charakterystyka wentylatora, wydajność wentylatora, spiętrzenie całkowite wentylatora, badania wentylatora, stanowisko badawcze

Keywords: ventube fan, fan's characteristics, fan's output, total fan's ram effect, fan's testing, testing facility

1. Wprowadzenie

Problematyka wyznaczania charakterystyk wentylatorów lutniowych jest określona w załączniku do normy PN-G-04165:1974 [5]. Norma ta podaje jedynie ogólne wytyczne do określania charakterystyk, nie precyzując sposobu ich wyznaczania, odwołuje się jedynie do projektu normy dotyczącej wyznaczania charakterystyk na stanowiskach badawczych. Szczegółowe zasady doświadczalnego wyznaczania charakterystyk wentylatorów podano w PN-EN ISO 5801:2008 [4]. Konieczność doświadczalnego wyznaczenia charakterystyki wentylatora lutniowego nie jest poza tym umocowana w innego rodzaju przepisach. W związku z powyższym doświadczalne wyznaczenie charakterystyki jest w wielu przypadkach zaniechywane.

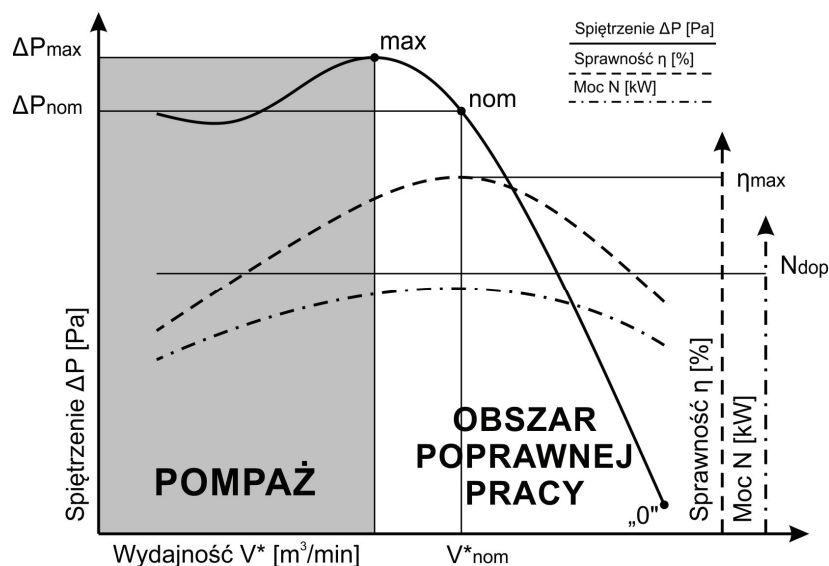
2. Charakterystyki wentylatorów lutniowych

Charakterystyki wentylatorów lutniowych przedstawiają zależności spiętrzenia całkowitego, mocy wentylatora oraz sprawności wentylatora od jego wydajności. Zazwyczaj przedstawia się je w formie wykresów, w układzie współrzędnych, w którym na osi poziomej przedstawiona jest wydajność, a na osiach pionowych – pozostałe parametry. Ze względu na duże różnice w wartościach liczbowych między spiętrzeniem (rzędu wielkości – tysiące paskali) a mocą i sprawnością (przeważnie kilkadziesiąt kW lub %), na wykresach używa się co najmniej dwóch różnych osi pionowych.

Typowe przebiegi charakterystyk wentylatora lutniowego przedstawiono na rysunku 1. Odpowiadają one charakterystykom wentylatorów stosowanych np. jako jednostki napędowe instalacji odpylających [7].

Charakterystyka spiętrzenia $\Delta P = f(V^*)$ rozpoczyna się w punkcie oznaczonym „0”, odpowiadającym swobodnemu przepływowi powietrza przez wentylator (bez dławienia). W miarę zwiększania dławienia wentylatora, wzrastają wartości spiętrzenia, a maleje jego wydajność. Krzywa przechodzi przez nominalny punkt pracy, oznaczony *nom*, a następnie osiąga maksimum w punkcie oznaczonym *max*. Ta część krzywej potocznie nazywana jest roboczą częścią charakterystyki lub – ze względu na jej położenie – prawą częścią charakterystyki. Dalsze dławienie powoduje wejście wentylatora w stan pompażu, charakteryzujący się jego niestabilną pracą. Praca wentylatora w stanie pompażu jest zabroniona. Dalsze dławienie powoduje, że spiętrzenie zazwyczaj początkowo maleje, po czym stabilizuje się na pewnym poziomie, bądź ponownie wzrasta, aż do punktu, w którym dalsze dławienie nie powoduje już znaczących zmian wydajności i spiętrzenia.

Krzywa sprawności $\eta = f(V^*)$ po stronie prawej części charakterystyki spiętrzenia osiąga maksimum, dla którego wydajność jest zazwyczaj większa niż wydajność odpowiadająca maksimum spiętrzenia. W pompażu, w miarę postępowania dławienia wentylatora, jego sprawność maleje w sposób monotoniczny.



Rys.1. Charakterystyki wentylatorów lutniowych [źródło: opr. wł.]

Krzywa mocy $N = f(V^*)$ ma zazwyczaj podobny przebieg do krzywej sprawności. Jej wyznaczenie pozwala na weryfikację, czy w czasie pracy wentylatora, dla założonej gęstości powietrza, nie występują przekroczenia dopuszczalnej mocy N_{dop} [W], którą dla zasilania prądem trójfazowym można określić na podstawie zależności:

$$N_{dop} = U_{nom} \times I_{nom} \times \sqrt{3} \times \cos \varphi \quad (1)$$

gdzie:

U_{nom} – nominalne napięcie zasilania silnika elektrycznego [V],

I_{nom} – nominalne natężenie prądu silnika elektrycznego [A],

$\cos \varphi$ – składowa współczynnika mocy związana z przesunięciem fazowym między pierwszą harmoniczną prądu i napięciem zasilania silnika elektrycznego.

lub, znając sprawność silnika elektrycznego:

$$N_{dop} = \frac{N_{nom}}{\eta_{el}} \quad (2)$$

gdzie:

N_{nom} – nominalna moc elektryczna silnika wentylatora [W],

η_{el} – sprawność silnika.

Krzywa mocy w żadnym punkcie nie może przekraczać poziomu mocy dopuszczalnej N_{dop} .

3. Nominalne parametry wentylatora lutniowego

Nominalne parametry wentylatora to wydajność i ciśnienie, określające punkt na charakterystyce wentylatora, w którym jego praca jest najbardziej efektywna w aspekcie energetycznym.

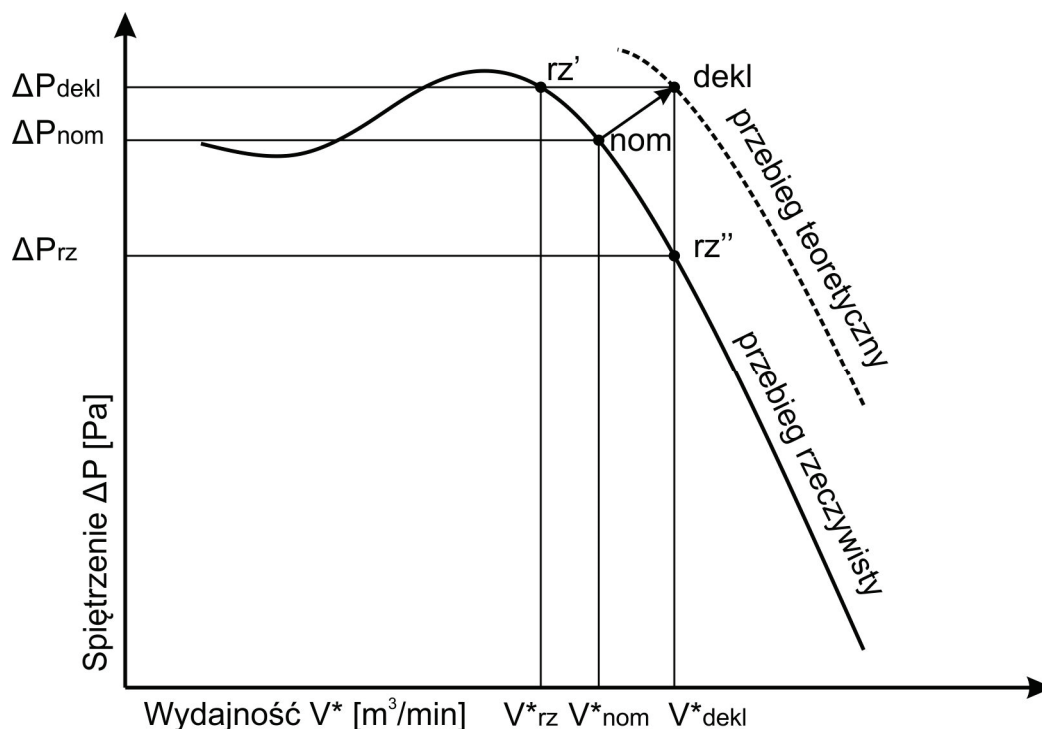
W praktyce, jako nominalny punkt pracy można przyjąć:

- 1) wydajność i odpowiadające jej ciśnienie, dla której wentylator osiąga maksimum sprawności,
- 2) wydajność odpowiadającą 90% wartości maksymalnego ciśnienia na roboczej (prawej) części charakterystyki,
- 3) wydajność i odpowiadające jej ciśnienie, dla której określono założenia obliczeń projektowych wentylatora.

Należy podkreślić, że przyjęcie nominalnych wartości wentylatora jest kwestią umowną. Wartości te określa producent wentylatora i podaje je w dokumentacji oraz na tabliczce znamionowej.

Charakterystyka wentylatora może być wyznaczona doświadczalnie, obliczeniowo lub na podstawie symulacji komputerowej przepływu powietrza w wentylatorze. W praktyce konieczne jest jednak każdorazowe doświadczalne zweryfikowanie wartości uzyskanych poprzez symulację teoretyczną lub obliczonych, ze względu na rozbieżności mogące wynikać m.in. z:

- niedokładności wykonania wentylatora,
- uproszczeń przyjętych w modelu obliczeniowym, np. założenia zerowej grubości łopatek wirnika i kierownicy, nieuwzględnienia wpływu rzeczywistych krawędzi łopatek na przepływ powietrza itp.,
- nieuwzględnienia w modelu obliczeniowym zadławień powodowanych przez niektóre elementy konstrukcyjne wentylatora, np. siatki ochronne na wlocie i wylocie wentylatora, kanały doprowadzające powietrze do silnika w wentylatorach o budowie typu „B” itp.,
- rozbieżności parametrów silnika elektrycznego z przyjętymi w modelu obliczeniowym.



Rys.2. Porównanie rzeczywistego przebiegu charakterystyki wentylatora z przebiegiem teoretycznym [źródło: opr. wł.]

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie rzeczywistego przebiegu charakterystyki spiężnienia z przebiegiem teoretycznym.

Zadeklarowanie przez producenta nominalnych parametrów wentylatora na obliczeniowej charakterystyce, oznaczonych jako punkt *dekl* może doprowadzić do uzyskania niższych rzeczywistych parametrów. Praca wentylatora przy zadeklarowanym spiężnieniu ΔP_{dekl} , odpowiada w rzeczywistości parametrom pracy określonym w punkcie *rz'* (wydajność jest niższa niż deklarowana wydajność V^*_{dekl}). Punkt pracy wentylatora zbliża się w tym przypadku do maksimum charakterystyki spiężnienia, co grozi niebezpieczeństwem wejścia w stan pompażu.

Eksploatacja wentylatora przy zadeklarowanej wydajności V^*_{dekl} prowadzi w rzeczywistości do pracy w punkcie oznaczonym *rz''*, w którym osiągnięte spiężnienie ΔP_{rz} , ze względu na przebieg charakterystyki, jest dużo niższe od deklarowanego spiężnienia ΔP_{dekl} .

Nominalny punkt pracy *nom*, któremu odpowiada nominalne spiężnienie ΔP_{nom} i nominalna wydajność V^*_{nom} powinien być zatem określony na podstawie charakterystyki wyznaczonej doświadczalnie. Posługiwanie się charakterystyką teoretyczną może bowiem doprowadzić do uzyskiwania niższych parametrów pracy wentylatora niż zadeklarowane przez producenta.

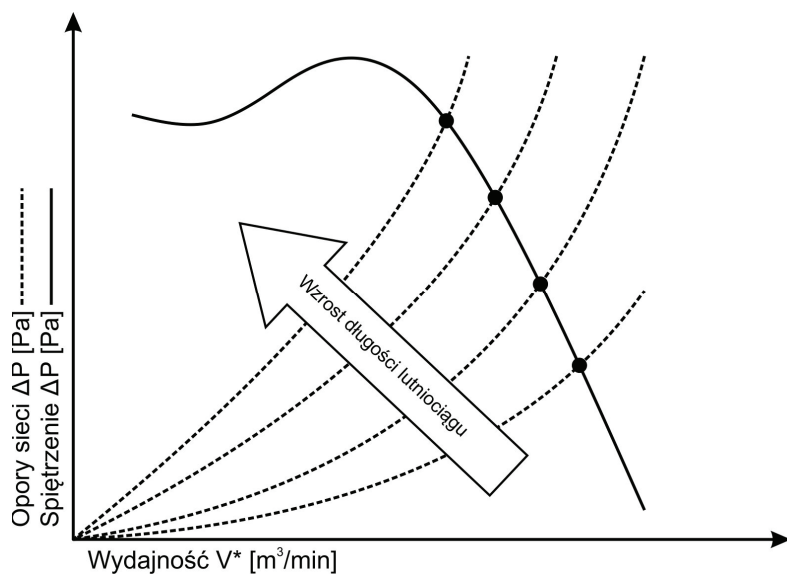
Powyższe przesłanki wyraźnie wskazują, że przeprowadzenie badań w celu wyznaczenia charakterystyki jest konieczne dla zagwarantowania prawidłowej i bezpiecznej pracy wentylatora.

4. Współpraca wentylatora lutniowego z siecią wentylacyjną

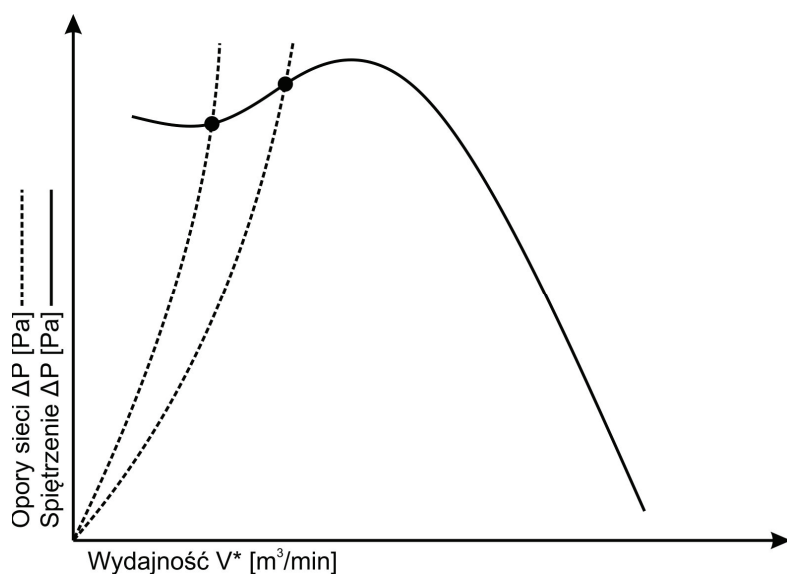
Podstawową funkcją wentylatora lutniowego jest przetłaczanie powietrza przez sieć wentylacyjną, którą może stanowić układ lutniociągów, instalacja odpylająca lub klimatyzacyjna. W sieci występują opory przetłaczania, rosnące z kwadratem prędkości przepływu powietrza (przy stałym polu przekroju – z kwadratem natężenia przepływu powietrza). W związku z tym sieć wentylacyjna ma charakterystykę o przebiegu parabolicznym, która przedstawia zależność oporów przepływu od wydajności powietrza.

Warunkiem poprawnej współpracy wentylatora z siecią wentylacyjną jest pokonanie oporów przepływu w sieci poprzez spiężnienie wytwarzane przez wentylator, przy wydajności w przedziale odpowiadającym roboczej części jego charakterystyki. Parametry, przy których wentylator poprawnie współpracuje z siecią wentylacyjną, odpowiadają punktowi, w którym charakterystyka sieci przecina roboczą część charakterystyki wentylatora, co przedstawiono na rysunku 3.

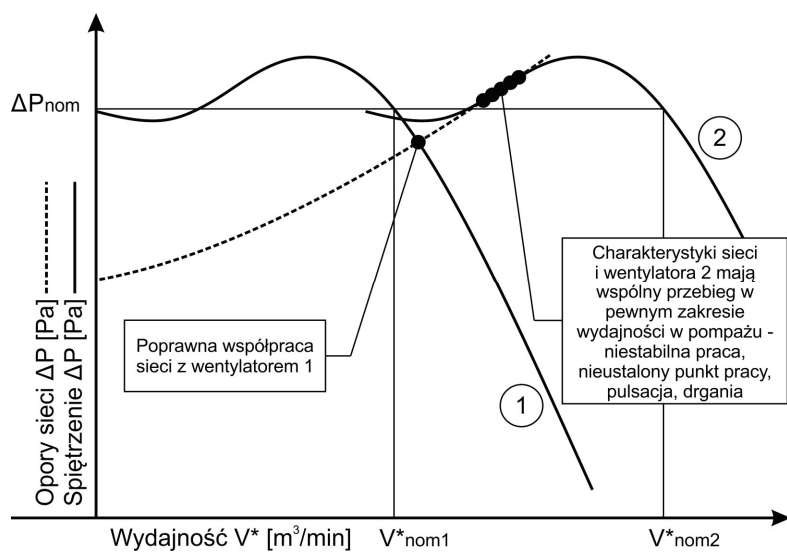
Należy podkreślić, że opory sieci mogą się zmieniać w czasie pracy, np. na skutek wydłużania lutniociągu (wzrost oporów przepływu), bądź poprzez zmniejszanie średnicy lutniociągu lub jego dławienie np. na skutek zagniecenia. W skrajnym przypadku opory sieci mogą być na tyle duże, że jej charakterystyka przecnie charakterystykę wentylatora w zakresie pompażu, co przedstawia rysunek 4.



Rys.3. Poprawna współpraca wentylatora z siecią wentylacyjną [źródło: opr. wł.]



Rys.4. Nieprawidłowa współpraca sieci wentylacyjnej z wentylatorem [źródło: opr. wł.]



Rys.5. Porównanie współpracy sieci wentylacyjnej z wentylatorami o różnych charakterystykach [źródło: opr. wł.]

W takim przypadku konieczne będzie zastosowanie innego wentylatora lub obniżenie oporów przepływu w sieci wentylacyjnej.

Dobór wentylatora do współpracy z daną siecią wentylacyjną powinien uwzględniać porównanie całej charakterystyki wentylatora z charakterystyką sieci wentylacyjnej i nie może się ograniczać jedynie do porównania parametrów nominalnych. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę przykładowej sieci wentylacyjnej oraz charakterystyki dwóch różnych wentylatorów.

Analizowane wentylatory charakteryzują się podobnym przebiegiem zmienności charakterystyki spiętrzenia, taką samą wartością spiętrzenia nominalnego ΔP_{nom} , ale różnymi wartościami wydajności nominalnej $V_{nom1}^* < V_{nom2}^*$. Wentylator oznaczony liczbą 1 współpracuje prawidłowo z siecią wentylacyjną (charakterystyka oznaczona linią przerywaną). Jej punkt przecięcia się z charakterystyką wentylatora 1 leży na roboczej części charakterystyki wentylatora. Inaczej jest w przypadku wentylatora oznaczonego liczbą 2. Tutaj charakterystyka sieci pokrywa się w określonym zakresie z charakterystyką wentylatora 2, w zakresie pompażu. Skutkiem tego jest nieustalony punkt pracy, co w praktyce może powodować pulsacje wydajności, drania, niestabilną pracę i skutkować awarią wentylatora. Prawidłowo dobranym wentylatorem jest wentylator 1, mimo że wentylator 2 ma wyższą wydajność nominalną V_{nom2}^* .

Analizowany przypadek obrazuje konieczność porównywania całej charakterystyki wentylatora z charakterystyką sieci wentylacyjnej. Porównanie tylko parametrów nominalnych mogłoby wskazywać na wybór wentylatora 2, który jednak nie byłby w stanie prawidłowo współpracować z siecią (przy niestabilnych warunkach pracy mogłaby wystąpić awaria).

5. Potrzeba doświadczalnego wyznaczenia charakterystyk wentylatora lutniowego

Doświadczałne wyznaczenie charakterystyk wentylatorów lutniowych powinno być prowadzone na znormalizowanych stanowiskach badawczych. Zgodnie z normą PN-EN ISO 5801:2008 [4], wyróżnia się cztery typy stanowisk badawczych:

- typ A – swobodny wlot i swobodny wylot z wentylatora,
- typ B – swobodny wlot, kanał po stronie wylotu z wentylatora,
- typ C – kanał po stronie wlotu do wentylatora, swobodny wylot,
- typ D – kanały po stronie wlotu i wylotu z wentylatora.

Stanowisko badawcze powinno odzwierciedlać rzeczywiste warunki pracy wentylatora. Z uwagi na możliwość współpracy wentylatorów lutniowych

z urządzeniami odpylającymi, badania należy prowadzić w układzie ssącym, czyli na stanowisku typu C (w rzeczywistych warunkach wentylatory te montuje się po stronie oczyszczonego powietrza, a więc za urządzeniem odpylającym – praca w układzie ssącym).

Badania polegają na wywoływaniu i zwiększaniu wartości dławienia wentylatora i rejestracji dla każdego stanu:

- parametrów fizykochemicznych (temperatura, wilgotność powietrza, ciśnienie atmosferyczne),
- wartości ciśnienia odpowiadającej wartości wydajności powietrza, w zależności od przyjętej metody pomiaru natężenia przepływu powietrza,
- wartości podciśnienia przed wentylatorem, odpowiadającej spiętrzeniu wentylatora,
- wartości parametrów elektrycznych prądu zasilającego silnik elektryczny, w tym przede wszystkim mocy pobieranej przez silnik.

Rejestrowane wartości przelicza się, zgodnie z procedurami obliczeniowymi podanymi w normie i w literaturze [1, 2], na wartości zredukowane dla wzorcowej gęstości powietrza:

- wydajność powietrza V^* ,
- spiętrzenie całkowite ΔP ,
- sprawność wentylatora η ,
- moc wentylatora N .

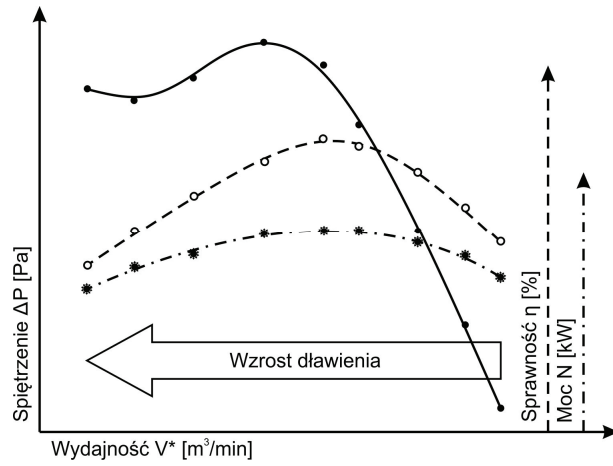
Jako wzorcową gęstość powietrza przyjmuje się wartość $1,2 \text{ kg/m}^3$ [5], jednak w przypadku wentylatorów, dla których przewiduje się eksploatację na dużych głębokościach, wyniki mogą zostać odniesione do wyższych wartości (w praktyce przyjmuje się wartości w przedziale od $1,2 \text{ kg/m}^3$ do $1,4 \text{ kg/m}^3$).

Dla każdego stanu dławienia i dla każdej krzywej uzyskuje się w ten sposób jeden punkt. Następnie na drodze estymacji, np. krzywymi wielomianowymi, uzyskuje się końcowe wykresy charakterystyk, co przedstawiono na rysunku 6.

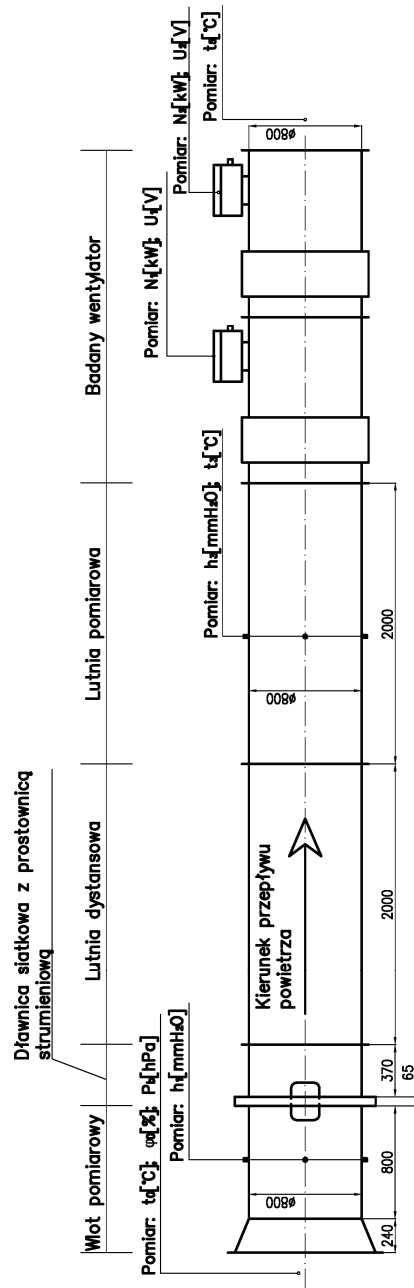
Instytut Techniki Górniczej KOMAG posiada znormalizowane stanowisko do badań wentylatorów lutniowych typu C, umożliwiające badania wentylatorów o średnicach od 600 do 1000 mm. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 7.

Powietrze jest zasysane do wentylatora przez układ pomiarowy, składający się z:

- stożka dopływowego ISO, służącego do pomiaru natężenia przepływu powietrza według PN-ISO 5221:1994 [6],
- dławnicy siatkowej, w której za pomocą różnej ilości siatek uzyskuje się różne stany dławienia wentylatora,
- lutni dystansowej z prostownicą strumienia, w której uzyskuje się wyprostowanie i uspokojenie strumienia,
- lutni pomiarowej, w której odczytywane są parametry strugi powietrza przed wentylatorem.



Rys.6. Doświadczalne wyznaczenie charakterystyk wentylatora [źródło: opr. wł.]



Rys.7. Schemat stanowiska badawczego [źródło: opr. wł.]

Zgodnie z wyżej wymienioną normą na stanowisku oznaczone są przekroje pomiarowe:

- 0 – przed wlotem do układu pomiarowego (parametry otoczenia),
- 1 – stożek dopływowy ISO,
- 3 – lutnia pomiarowa przed wentylatorem,
- 5 – wylot z wentylatora.

Na stanowisku badane są wentylatory lutniowe, w tym wentylatory: jednostopniowe, dwustopniowe przeciwbieżne, dwustopniowe szeregowe, jedno- i dwubiegowe. Prowadzone badania mają charakter badań prototypów wentylatorów, jak również badań weryfikacyjnych, mających na celu potwierdzenie parametrów deklarowanych przez producentów.

Wykonywane są również prace badawcze, w wyniku których określa się wpływ regulacji prędkości obrotowej wirnika wentylatora, za pomocą przemiennika częstotliwości, na uzyskiwane parametry przepływowe [3]. Stanowisko służy również do optymalizacji konstrukcji wentylatorów np. poprzez badanie wentylatorów z różnymi wirnikami w celu określenia wariantu gwarantującego osiągnięcie najwyższych parametrów.

6. Podsumowanie

Prawidłowe wyznaczenie charakterystyk ruchowych wentylatorów lutniowych umożliwia ich poprawną współpracę z sieciami wentylacyjnymi.

Charakterystyki wentylatorów należy każdorazowo wyznaczać doświadczalnie w celu uniknięcia błędów mogących wynikać z uproszczeń przyjmowanych w modelach obliczeniowych oraz w celu uwzględnienia rozbieżności pomiędzy modelem a rzeczywistą konstrukcją. Doświadczalne wyznaczenie charakterystyk może również zostać wykorzystane do doskonalenia modeli obliczeniowych, w tym weryfikacji, czy zakładane w modelu parametry znajdują odzwierciedlenie w wynikach uzyskiwanych eksperymentalnie oraz do eliminacji błędów w modelach.

Analiza charakterystyki wentylatora i charakterystyki sieci, z którą wentylator ma współpracować, pozwala ustalenie warunków prawidłowej i bezpiecznej pracy.

Instytut Techniki Górniczej KOMAG dysponuje znormalizowanym stanowiskiem badawczym, pozwalającym na wyznaczanie rzeczywistych charakterystyk wentylatorów lutniowych, jak również na weryfikację parametrów podawanych przez producentów lub wynikających z modelu obliczeniowego, jak również badanie wpływu czynników eksploatacyjno – konstrukcyjnych na parametry pracy wentylatorów.

Literatura

1. Bieniek Cz., Kolendarski W., Ostrowski J., Sobczyński W.: Wentylatory osiowe, Wydawnictwa naukowo – Techniczne, Warszawa 1961.
2. Fortuna S.: Wentylatory – podstawy teoretyczne, zagadnienia konstrukcyjno – eksploatacyjne i zastosowanie, Techwent, Kraków 1999.
3. Jedziniak M.: Regulacja prędkości obrotowej wentylatora lutniowego za pomocą przemiennika częstotliwości część I. Maszyny Górnicze 2012 nr 4 s. 23-27.
4. PN-EN ISO 5801:2008 Wentylatory przemysłowe. Badanie charakterystyk działania na stanowiskach znormalizowanych.
5. PN-G-04165:1974 Wentylatory osiowe miejscowego przewietrzania. Podstawowe wymagania.
6. PN-ISO 5221:1994 Rozprowadzanie i rozdział powietrza. Metody pomiaru przepływu strumienia powietrza w przewodzie.
7. Prostański D., Jedziniak M.: Rozwój systemów zwalczania zagrożeń pyłowych. Maszyny Górnicze 2013 nr 2 s. 87-98.

Artykuł wpłynął do redakcji w czerwcu 2014 r.