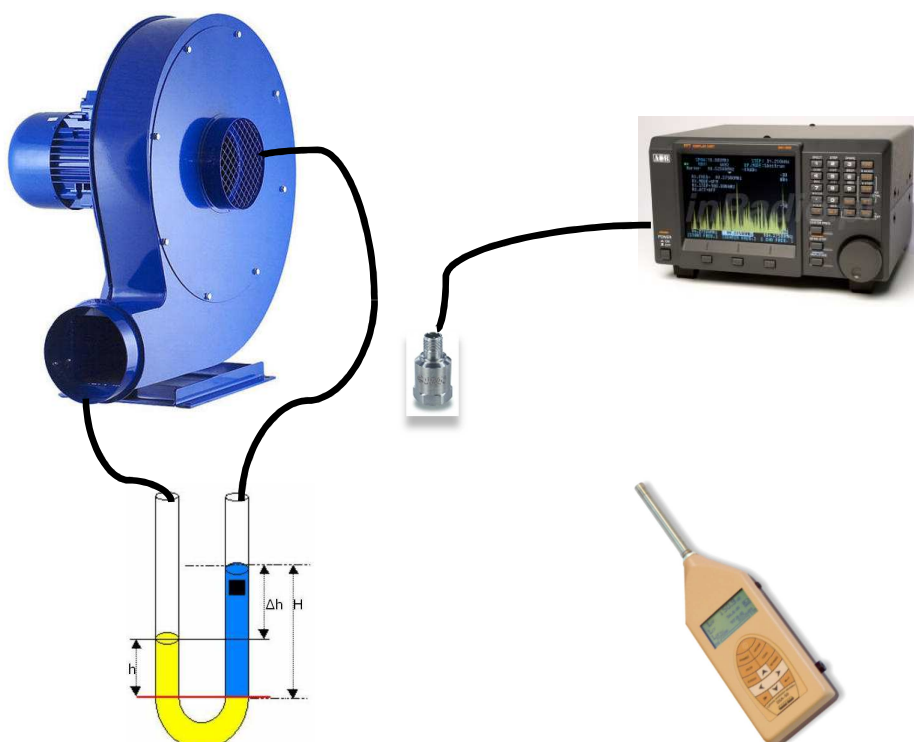


LABORATORIUM

# DIAGNOSTYKA WIBROAKUSTYCZNA WENTYLATORÓW PROMIENIOWYCH



Zakres ćwiczenia:

1. Wentylatory – budowa i zasada działania
2. Ruch medium roboczego w maszynach przepływowy
3. Mechanizm powstawania zjawisk WA w maszynach wirnikowych
4. Podstawy diagnostyki wentylatorów
5. Wykonanie pomiarów
6. Analiza wyników pomiarów

Do wykonania przez studentów:

1. Zapoznać się ze stanowiskiem pomiarowym oraz torem pomiarowym
2. Wykonać pomiary parametrów pracy wentylatora dla różnego stopnia przesłonięcia wlotu kanału dolotowego
3. Przeprowadzić analizę widmową hałasu dla różnych stopni przesłonięcia wlotu kanału dolotowego.
4. Opracować wyniki pomiarów
5. Zaliczyć ćwiczenie

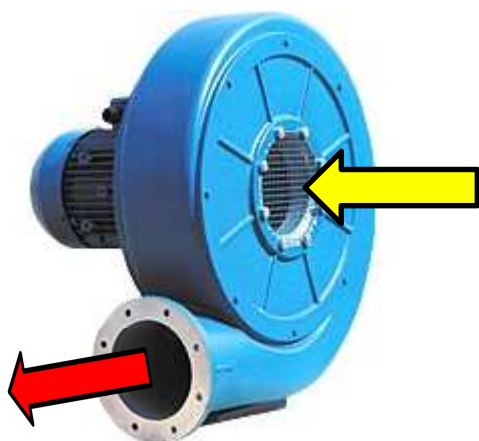
## 1. WSTĘP

Wentylatory są maszynami przepływowymi do transportowania powietrza z pomieszczeń do otoczenia lub odwrotnie. Używane są również do transportowania innych gazów przez przystosowane urządzenia wentylacyjne, za pośrednictwem przewodów transportowych. Przekazanie energii potrzebnej do pokonania oporów przepływu odbywa się w wirniku, czyli podstawowej części składowej wentylatora. Drugim elementem składowym wentylatora jest silnik, przeważnie elektryczny. Z tych dwóch części montuje się najprostsze wentylatory, stosowane do wydmuchiwania powietrza z obiektów przez otwory ściennie lub do wymuszania obiegu powietrza w pomieszczeniach czy komorach. W przypadku potrzeby transportowania czynnika rurociągiem na dalsze odległości, wirnik wentylatora musi zostać wyposażony w obudowę spiralną lub rurową oraz króćce na ssaniu i tłoczeniu, ewentualnie aparat do regulacji wydajności, kierownice prostujące strugę, złączki elastyczne, amortyzatory drgań, łożyskowanie ze sprzęgłem, przekładnie obrotów i podstawę nośną.

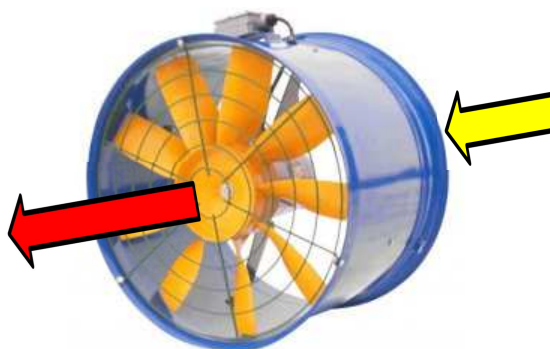
We wszystkich gałęziach przemysłu, obok prostych wentylatorów spełniających rolę maszyn dostarczających świeże powietrze do pomieszczeń, w których przebywa człowiek, coraz częściej wykorzystuje się wentylatory o znacznym stopniu skomplikowania konstrukcyjnego i dużych rozmiarach, spełniające funkcje ważnych maszyn technologicznych. W każdym z tych przypadków problem dyspozycyjności i awaryjności maszyn jest niezwykle istotny, dlatego też wyłania się potrzeba określenia bieżącego stanu eksploatacyjnego tych maszyn oraz zagadnienia predykcji ich dalszego bezawaryjnego czasu pracy. By zminimalizować straty wywołane awarią maszyn konieczne jest diagnozowanie stanu wentylatora by możliwe było szybkie określenie uszkodzenia i zaplanowanie przestoju konserwacyjnego. Jedną z metod diagnostycznych polega na analizie sygnału wibroakustycznego.

## 2. BUDOWA WENTYLATORÓW PROMIENIOWYCH I OSIOWYCH

Wentylatory mogą pracować jako urządzenia wciągowe, podmuchowe lub jako ssąco-tłoczące. Są one szeroko stosowane w przemyśle. Obok pomp hydraulicznych stanowią one największą grupę urządzeń pomocniczych, zarówno pod względem liczby, jak i sumarycznej mocy. Do największych i najważniejszych wentylatorów należą wentylatory powietrza (podmuchu) oraz wentylatory spalin (ciągu) stosowane w elektrowniach. Ponadto wyróżnić można wentylatory młynowe, wentylatory stosowane w tzw. chłodniach wentylatorowych do chłodzenia skraplaczy turbin, wentylatory w układach odpowielania pneumatycznego oraz szereg wentylatorów stosowanych w różnych układach chłodzenia (generatorów, transformatorów itp.). Pod względem konstrukcyjnym (zależnie od kierunku przepływu czynnika) rozróżnia się wentylatory promieniowe i osiowe. W wentylatorach promieniowych przepływ czynnika jest prostopadły do osi wirnika (rys. 1), natomiast w osiowych - równoległy (rys. 2).

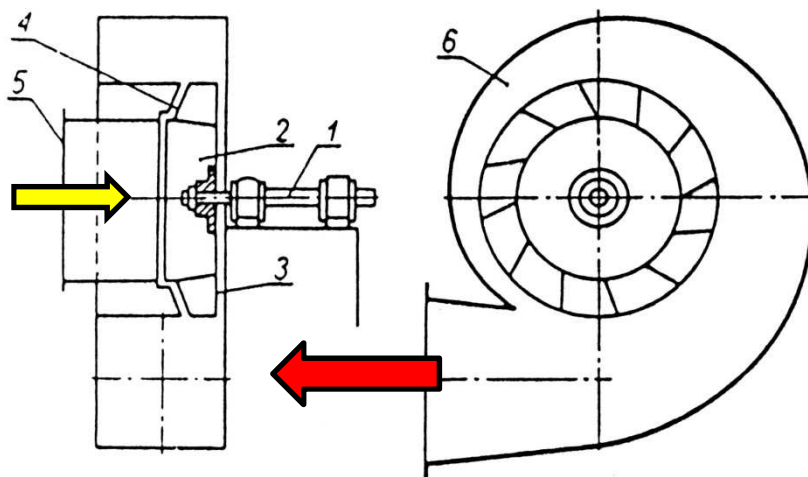


Rys.1. Wentylator promieniowy (  kanał ssawny,  kanał wylotowy)

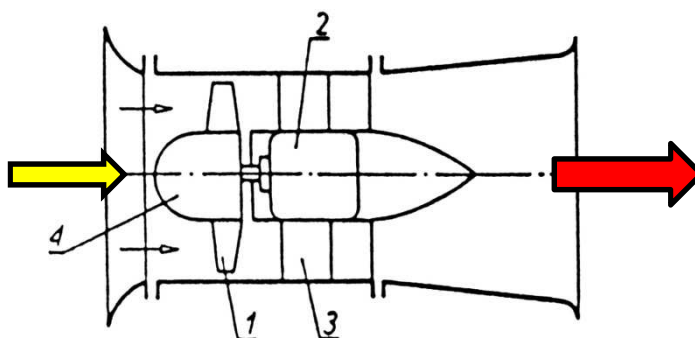


Rys.2. Wentylator osiowy (  kanał ssawny,  kanał wylotowy)

Elementy składowe wentylatorów promieniowego i osiowego pokazano na rys. 3 i 4.



Rys.3. Wentylator promieniowy – budowa (1 - wał napędowy, 2 - wirnik, 3 - tarcza nośna, 4 - tarcza pokrywająca, 5 - wlot, 6 - spiralna obudowa)



Rys.4. Wentylator osiowy – budowa (1 - wirnik, 2 - silnik elektryczny, 3 - kierownica, 4 – kołpak)

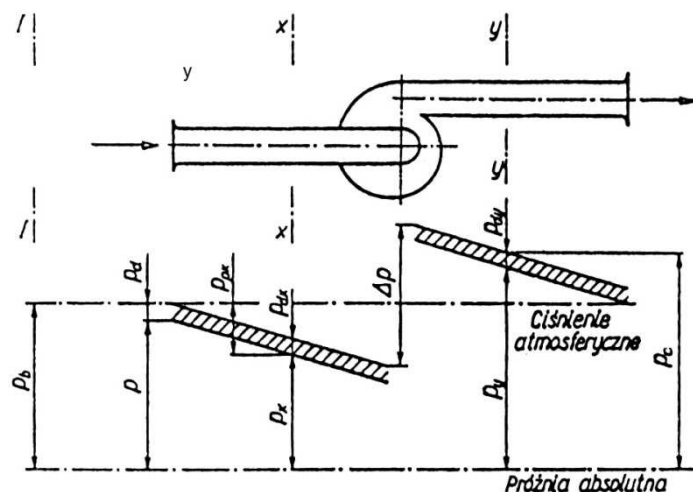
W wentylatorach przetłaczanie oraz przyrost ciśnienia całkowitego czynnika następuje dzięki pracy zewnętrznej doprowadzonej do wirnika (np. za pomocą silnika elektrycznego). Po nadaniu mu ruchu obrotowego, porcje gazu znajdujące się w obrębie kanałów międzyłopatkowych przemieszczają się pod wpływem sił wywołanych przez obracający się wieniec w kierunku promieniowym (maszyny promieniowe) lub osiowym (maszyny osiowe). W przestrzeni międzyłopatkowej wytwarza się podciśnienie, dzięki czemu przez wlot napływają nowe porcje gazu. Podczas przepływu przez obracający się wieniec łopatkowy, czynnik doznaje przyrostu energii kinetycznej i ciśnienia statycznego. Przekazana w wirniku energia musi być wystarczająca na pokonanie oporów przepływu przez część ssawną i tłoczną rurociągu, uzyskanie wymaganego ze względu na warunki pracy wentylatora użytecznego ciśnienia statycznego oraz musi zapewnić czynnikowi odpowiednią prędkość. Na rys. 5 przedstawiona została zmienność ciśnienia gazu podczas przepływu przez rurociąg ssawno-tłoczny wentylatora. W dowolnym przekroju części ssawnej x-x (tłocznej y-y) ciśnienie całkowite  $p_c$  jest wyrażone zależnością (1):

$$p_{cx} = p_x + p_{dx} = p_x + \frac{\rho_x \cdot v_x^2}{2}$$

$$p_{cy} = p_y + p_{dy} = p_y + \frac{\rho_y \cdot v_y^2}{2}$$
(1)

gdzie:

- $p_x, p_y$  - ciśnienie statyczne,
- $p_{dx}, p_{dy}$  - ciśnienie dynamiczne,
- $\rho_x, \rho_y$  - gęstość gazu,
- $v_x, v_y$  - prędkość średnia gazu.



Rys.5. Rozkład ciśnień w rurociągu ssawnym i tłocznym wentylatora

### 3. RUCH MEDIUM ROBOCZEGO

W maszynach przepływowych, których funkcja polega na zmianie energii czynnika roboczego (np. sprężarki, pompy, dmuchawy wentylatorów), bądź wykorzystaniu energii czynnika (np. turbiny, układy pneumatyczne, hydrauliczne, a nawet silniki spalinowe), ogólna zasada pracy polega na tworzeniu lub wykorzystywaniu niejednorodnego rozkładu prędkości i ciśnienia czynnika. Ten proces ukierunkowanego tworzenia niejednorodności odbywa się w przestrzeniach roboczych maszyn w stałej interakcji trzech podstawowych elementów maszyn przepływowych: 1) korpusu, czyli obudowy przestrzeni roboczej maszyny, 2) czynnika roboczego (ciecz, gaz), 3) części ruchomej w postaci wirnika lub tłoka. Każda więc zmiana energii czynnika, w szczególności jego ciśnienia i/lub prędkości jest w taki sam sposób odbierana przez korpus i organ ruchomy maszyny. Z mechaniki płynów wiadomo, że jeśli w strudze czynnika porusza się ciało ze względną prędkością  $v(t)$  to ciśnienie na nie działające wyniesie:

$$p_c(t) = p + \rho \cdot \frac{v^2(t)}{2} = p + \rho \cdot \frac{[v_0 + \bar{v}(t)]^2}{2} \quad (2)$$

gdzie:

$p$  – ciśnienie statyczne w strudze,

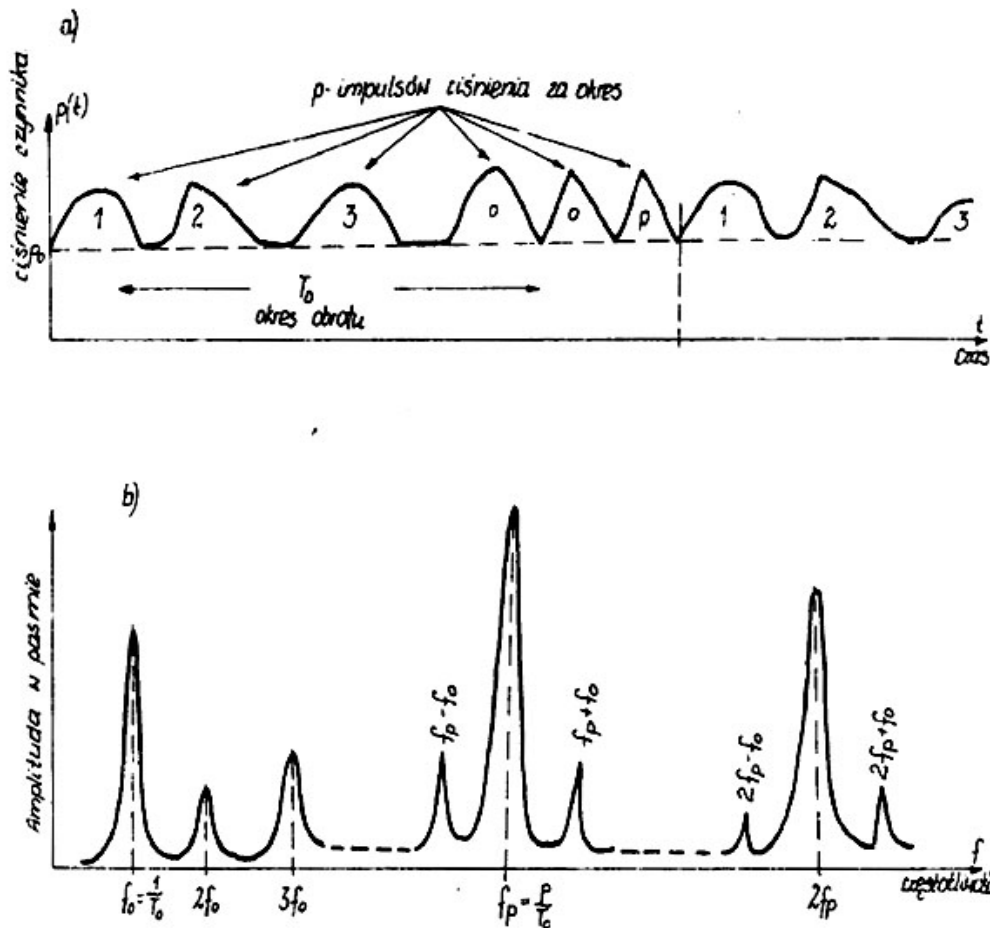
$v(t) = v_0 + \bar{v}(t)$  - chwilowa wartość prędkości rozpatrywanego elementu strugi ze składową pulsacyjną  $\bar{v}(t)$ ,

$\rho$  – gęstość czynnika roboczego (gazu).

Struktura widmowa wymuszenia i drgań w maszynach przepływowych jest bardzo złożona i najlepiej wymuszenie to rozpatrywać jako okresowy ciąg impulsów wynikający z liczby  $b$  łopatek (cylindrów) itp., powtarzany z okresem obrotu wirnika bądź wału korbowego (rys.6a). Sąsiednie impulsy w ramach okresu  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  są tutaj podobne lecz nieidentyczne. Stąd częstotliwością

podstawową jest  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{T_0}$  z kolejnymi harmonicznymi, aż do częstotliwości łopatkowej  $f_p = b \cdot f_0$

i jej kolejnych harmonicznymi  $f = m \cdot b \cdot f_0$ , gdzie  $m = 1, 3, \dots$ , tak jak na rys. 6b.



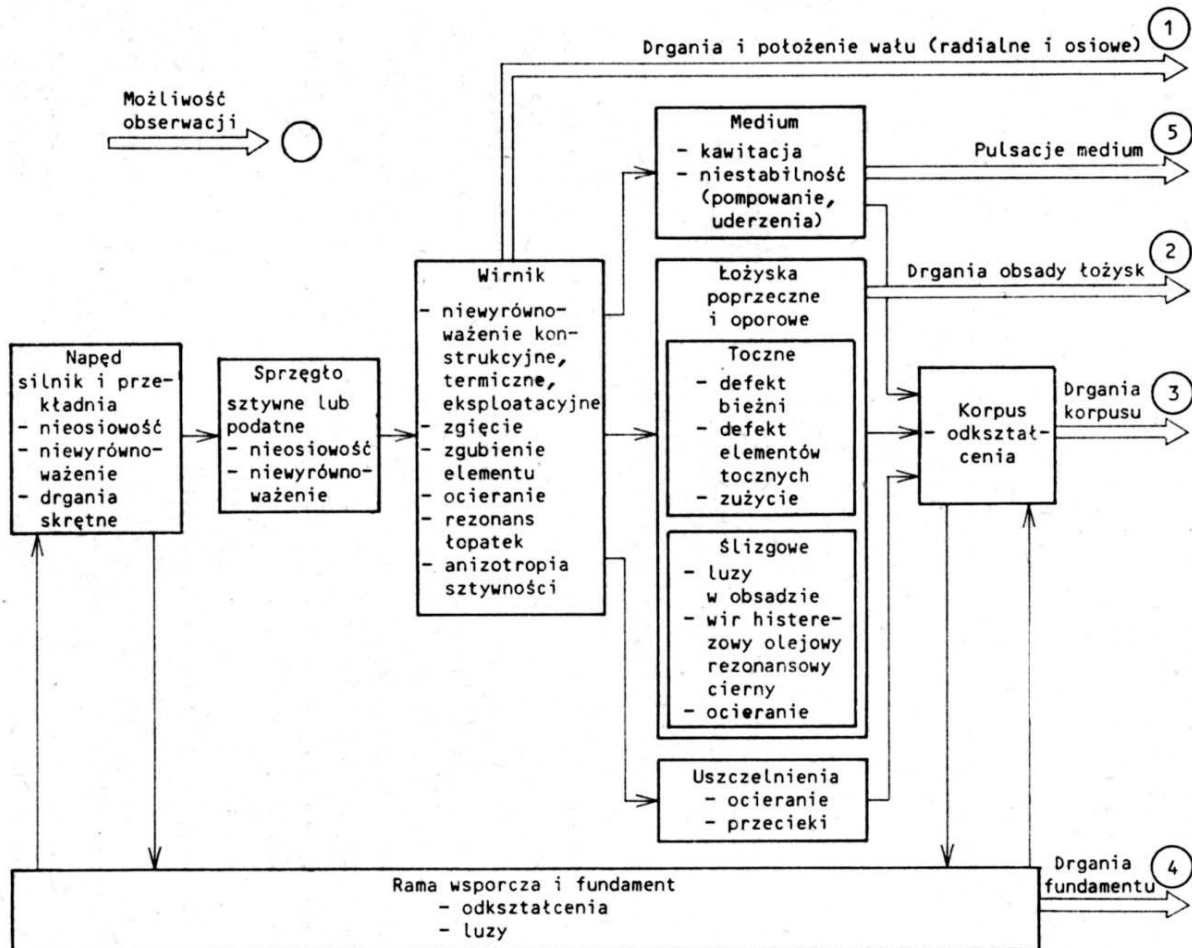
Rys.6. Ciąg impulsów okresowych pulsacji medium w maszynach przepływowych (a) i jego charakterystyka widmowa (b)

#### 4. MECHANIZM POWSTAWANIA ZJAWISK WA W MASZYNACH WIRNIKOWYCH

Maszyny wirnikowe wyposażone są w wirnik z układem łopatek zamontowany obrotowo w korpusie za pomocą łożysk tocznych albo ślizgowych, z których jedno jest na ogół poprzeczne, a drugie oporowe przenoszące część masy wirnika i napór medium roboczego. Ruch medium roboczego jest wymuszony ruchem wirnika i specjalnym kształtem korpusu (np. układem kierownic). Napęd maszyn wirnikowych (najczęściej silnik elektryczny) może jedynie uczestniczyć w tworzeniu nieosiowości i drgań skrętnych niskoczęstotliwościowego układu wirującego. Wirnik maszyny przepływowej może być niewyrównoważony statycznie oraz dynamicznie, co w połączeniu z deformacją korpusu i zużyciem łożysk może doprowadzić do jego wygięcia, przesunięcia poosiowego, ocierania o korpus itp. Jeśli wirnik osadzony jest na łożyskach tocznych, to siły w nim generowane są modulowane przez niesprawność łożyska. Wirnik za pomocą układu łopatek wykonuje pracę przetłaczając medium gazowe lub płynne. Ruch medium daje zwrotne oddziaływanie siłowe na wirnik i korpus pobudzając obydwa elementy do drgań. W tym współdziałaniu korpus drga szerokopasmowo zgodnie z widmem wymuszenia, natomiast w drganiach wirnika wymuszonych przez przetłaczanie medium dominują częstotliwości własne wału i łopatek. Przy silnych drganiach rezonansowych częstotliwości te można znaleźć również w widmie drgań korpusu, jako że drgająca łopaska daje zaburzenia ruchu medium co z kolei przenosi się na korpus. Na rys. 7 przedstawiono poglądowy mechanizm oddziaływań dynamicznych w maszynie wirnikowej, czyli mechanizm powstawania zjawisk WA, łącznie z przedstawieniem najczęstszych uszkodzeń każdego z podzespołów.

Z rys. 7 wynika, że mamy do dyspozycji 5 kanałów obserwacji, ale w praktyce wykorzystujemy tylko 3 tzn.: drgania i ruch wału, drgania osady łożysk oraz ewentualnie drgania korpusu. Elementem o największym prawdopodobieństwie uszkodzenia w maszynie wirnikowej jest sam wirnik. Można wyróżnić następujące rodzaje niesprawności wirnika:

- niewyrównoważenie konstrukcyjne, termiczne (nierównomierność nagrzewania), eksploatacyjne (osadzanie się cząsteczek medium roboczego, erozja wirnika),
- wygięcie, np. na skutek działania dużych sił stałych i płynięcia materiału,
- zgubienia elementów, np. łopatek,
- ocieranie o elementy korpusu jako skutek dużych drgań, stałego zgięcia wirnika lub też przesunięcia osiowego wirnika jako całości,
- rezonans pakietu łopatek, który prowadzi do drgań rezonansowych ( $2 \times f_0$ ; gdzie  $f_0$  - częstotliwość obrotowa wału) i w efekcie do zmęczenia materiału.



Rys.7. Uszkodzeniowo zorientowany schemat oddziaływań siłowych w maszynie przepływowej wraz z potencjalnymi możliwościami odbioru sygnałów diagnostycznych

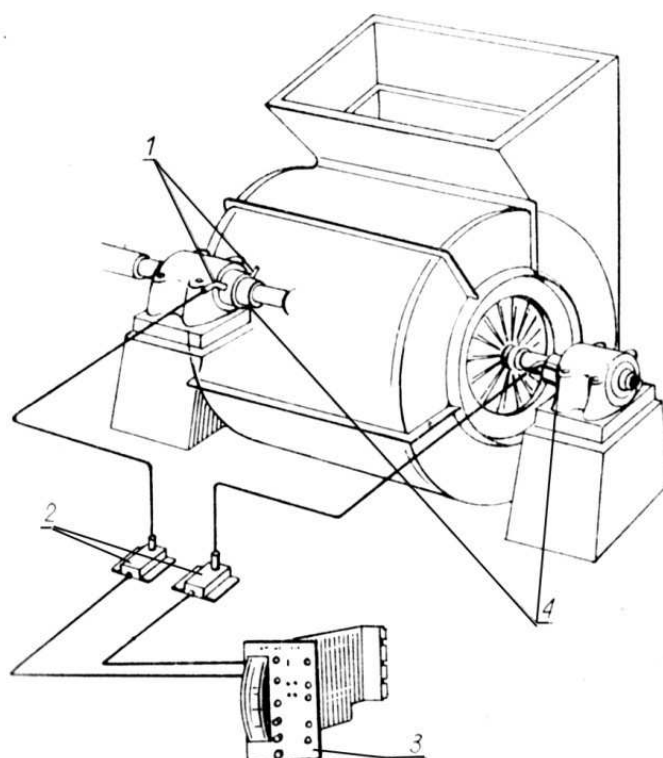
Dla dużego i sztywnego wirnika oraz sztywnego łożyskowania (łożyska toczne), należy zastosować pomiar drgań obsady łożysk lub korpusu (w przypadku zablokowania konstrukcyjnego tych elementów). Jako przetwornika drgań używa się z reguły akcelerometru, co oprócz obserwacji sygnału przyspieszeń umożliwi (po scałkowaniu) obserwację prędkości i przemieszczeń drgań.

Z obserwacji pulsacji medium roboczego można by wnioskować o stanie wirnika, o jego liczbie łopatek itp. oraz o stanie naprężeniowym tych elementów. Jest to możliwe, gdyż np. każda łopaska wirnika przechodząc obok stacjonarnego elementu korpusu generuje impuls ciśnienia o charakterze zależnym od konstrukcji i prędkości obrotowej maszyny. Tak więc choćby częściowa utrata łopaski w wieńcu zmieni ciąg impulsów ciśnienia generowanych przez wieńiec.

## 5. PODSTAWY DIAGNOSTYKI WENTYLATORÓW

Wentylatory promieniowe używane do wytwarzania ciągu lub nadmuchu posiadają wirnik o dużej średnicy i osiągają prędkości eksploatacyjne rzędu 500÷900 obr./min. Główne problemy eksploatacyjne wentylatorów są związane z niewyrównoważeniem i nieosiowością. Niewyrównoważenie eksploatacyjne jest spowodowane nierównomiernym osadzaniem się

zanieczyszczeń pochodzących z przetłaczanego powietrza. Nieosiowość zaś pochodzi od wadliwego sprzężenia maszyny z napędem. Niesprawności te ujawniają się w paśmie częstotliwości obrotowych drgań (niewyrównoważenie –  $f_0$ , luzy  $2 f_0$ , nieosiowość -  $2 f_0$ ,  $3 f_0$ ) i mogą być łatwo wychwycone za pomocą dowolnego systemu drganiowego. Jeśli łożyska ślizgowe są podparte na sztywnych żelbetonowych podporach, jedyną alternatywą jest nadzór względnych przemieszczeń wału. W tym przypadku mierzy się jedynie drgania radialne wału z wyłączeniem osiowych, tak jak zilustrowano to na rys. 8. Jeśli natomiast wirnik jest łożyskowany tocznie, a obudowa łożysk zblokowana z korpusem, to rozwiązaniem optymalnym jest instalacja czujnika sejsmicznego na obudowie łożyska najlepiej w kierunku poziomym. Do nadzoru ruchu i drgań wału należy wtedy wydzielić z sygnału odrębne pasmo w granicach  $\Delta f = (0.5 f_0 \div 4 f_0)$ . Jest to tym bardziej korzystne, że można się odciąć od zakłóceń aerodynamicznych w kanałach wentylacyjnych, a także od częstotliwości łopatkowej  $f_p = b f_0$ . Zmierzoną wartość przyspieszenia w pasmie częstotliwości wysokich ( $f > 10$  kHz) można wykorzystać do nadzoru stanu łożysk tocznych.

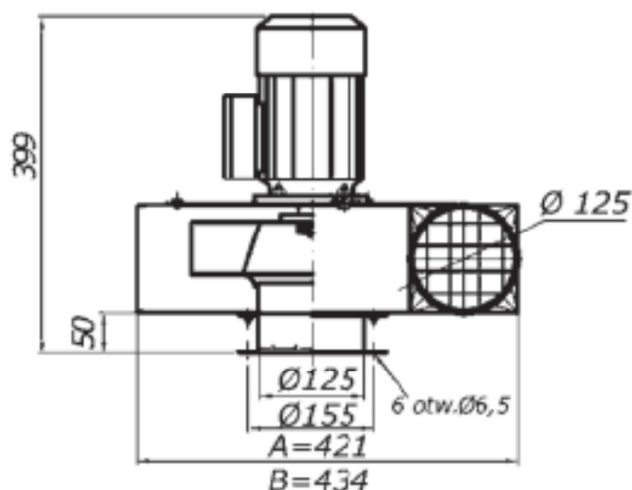


Rys.8. Przykładowy układ nadzoru drganiowego wentylatora: 1 – dwa bezkontaktowe czujniki przemieszczeń wału ustawione pod kątem  $90^\circ$ , 2 – demodulatory, 3 – miernik drgań, 4 – czujniki drgań wału do ciągłej obserwacji i analizy

## 6. BADANIA

### 6.1. Obiekt badań

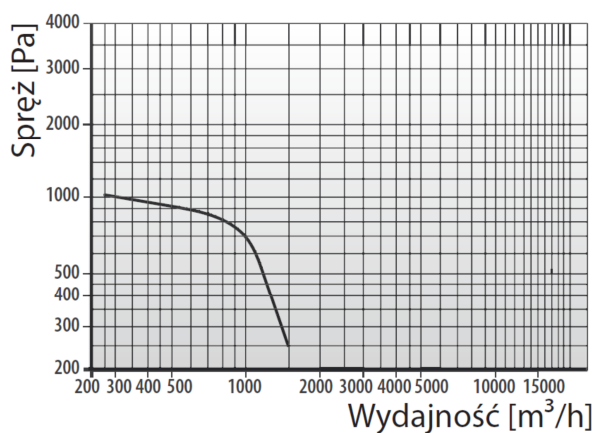
W ramach niniejszej pracy został poddany diagnostyce wentylator promieniowy WPE-3-1 firmy KLIMAWET. Wymiary katalogowe wentylatora przedstawiono na rys. 9.



Rys.9. Badany wentylator WPE-3 firmy KLIMAWENT

Wentylatory WPE-3 są przeznaczone przede wszystkim do wentylacji miejscowej. Zdolność do pokonywania znacznych oporów przepływu czyni je szczególnie przydatnymi do współpracy z instalacjami odciągów miejscowych. Badany wentylator składa się ze spiralnej obudowy stalowej i silnika elektrycznego z osadzonym na jego wale wirnikiem promieniowym.

Wentylator posiada silnik firmy BESEL S.A. o mocy 0,36 kW typu SEMLH 71-2B. Wymiary wentylatora z napędem (długość x wysokość x szerokość) wynoszą: 399 mm x 434 mm x 421 mm. Średnica króćca wylotowego i wlotowego wynosi 125 mm. Na rys. 10 zamieszczono charakterystykę analizowanego wentylatora.

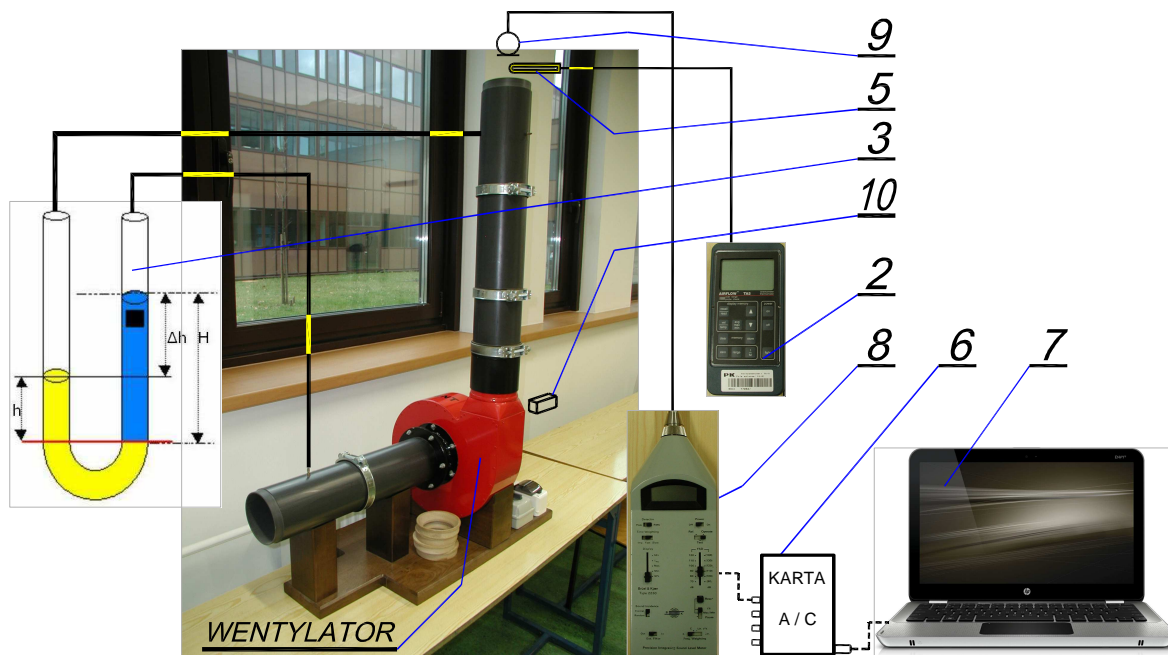


Rys.10. Charakterystyka wentylatora WPE-3

## 6.2. Badanie wpływu obciążenia wentylatora na wartość sygnału akustycznego

Badanie wpływu obciążenia wentylatora na wartość parametrów sygnału akustycznego wywołane pracą urządzenia przeprowadza się na stanowisku pokazanym na rysunku 11.





Rys.11. Schemat stanowiska pomiarowego (2- termooanemometr, 3- u-rurka, 5 – sonda termooanemometru, 6 – karta analogowo – cyfrowa, 7 – komputer PC, 8 – precyzyjny miernik poziomu dźwięku, 9 – mikrofon pomiarowy, 10 - tachometr)

Główne elementy badanego układu stanowią: badany wentylator z króćcami i elementami służącymi do dławienia przepływu wentylatora, oraz elementy toru pomiarowego. W skład toru pomiarowe wchodzi: precyzyjny miernik poziomu dźwięku (8) wraz z mikrofonem (9), u – rurka (3) do pomiaru różnicy ciśnienia statycznego czynnika roboczego w kanałach dolotowym i wylotowym oraz termooanemometr (2) z sondą pomiarową (5). Sygnał z mikrofonu (9) jest przesyłany na kartę A/C (6) i dalej do komputera. Odczytane wartości z termooanemometru (2), tachometru (10) i u – rurki (3) ręcznie są również wprowadzane do komputera.

Mikrofon pomiarowy znajduje się na wysokości kanału wylotowego wentylatora. Przewody u – rurki przymocowane są do króćców umieszczonych w kanałach zasilającym i wylotowym. Sonda termooanemometru umieszczona jest tuż nad kanałem wylotowym. Przy pomocy tachometru mierzone są obroty silnika napędu.

#### • Badania wpływu obciążenia wentylatora na widmo akustyczne

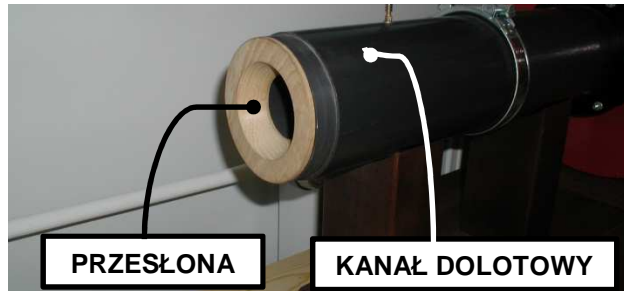
Pomiar polega na ocenie wpływu obciążenia wentylatora na kształt widma hałasu wentylatora. Podczas pomiaru dokonywana będzie analiza widmowa poziomu ciśnienia akustycznego mierzonego w pobliżu kanału wylotowego wentylatora. Pomiar będzie wykonany dla zmiennego obciążenia wentylatora (zmiana średnicy wlotu kanału dolotowego wentylatora przy pomocy przesłony). W trakcie pomiaru rejestrowane będą: różnica ciśnień  $\Delta p$  w kanałach ssawnym i tłocznym oraz wydatek wentylatora.

Przed pomiarem należy:

- zebrać parametry wentylatora: obroty silnika, ilość łopatek wentylatora,
- w formie tabelarycznej przestawić elementy toru pomiarowego.

Badanie przeprowadza się następująco:

- do kanału dolotowego należy wsunąć odpowiednią przesłonę (o odpowiedniej średnicy - patrz rys. 12) i obliczyć procent przesłonięcia kanału dolotowego; pomiar rozpocząć dla kanału dolotowego bez założonej przesłony,



Rys.12. Kanał dolotowy z założoną przesłoną

- uruchomić wentylator,
- przy pomocy tachometru określić obroty silnika i porównać z obrotami odczytanymi z tabliczki znamionowej silnika,
- umieścić mikrofon pomiarowy z założoną osłoną przeciwwietrzną w pobliżu kanału wylotowego,
- umieścić sondę termooanemometru bezpośrednio nad wylotem kanału wylotowego,
- przy pomocy u – rurki wykonać pomiar różnicy ciśnień statycznych  $\Delta p$  w kanałach ssawnym i tłocznym,
- wykonać analizę widmową hałasu i zarejestrować widmo na komputerze PC,
- zmienić / założyć przesłonę o zadanej średnicy i powtórzyć procedurę,
- obliczyć częstotliwość podstawową (obrotową)  $f_o$  i łopatkową  $f_p$  układu zgodnie z zależnościami (3) i (4)

$$f_o = \frac{n}{60} \text{ [Hz]} \quad (3)$$

$$f_p = f_o \cdot b = \frac{n \cdot b}{60} \text{ [Hz]} \quad (4)$$

gdzie:

$n$  – obroty silnika zmierzone przy pomocy tachometru, [obr. /min.],  
 $b$  – liczba łopatek wirnika wentylatora, [szt.]

- z widm hałasu uzyskanych dla poszczególnych przesłon odczytać częstotliwości dominujące,
- określić prawdopodobne uszkodzenia wentylatora (patrz punkt 5),
- wykreślić wykres zmian poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji wydatku w  $[\text{m}^3/\text{h}]$  wentylatora, dla różnych stopni przesłonięcia wlotu kanału dolotowego wentylatora,
- wykreślić wykresy zmian ciśnienia akustycznego  $p_a$  w funkcji częstotliwości oraz wykres zmian ciśnienia akustycznego w dziedzinie rzędów  $\frac{f}{f_o}$ ; wykresy wykonać dla poszczególnych stopni sprężania wentylatora,
- dokonać analizę wyników.

## 7. LITERATURA

- [1] Cempel Cz.: *Wibroakustyka stosowana*, PWN, Warszawa 1989
- [2] Cempel Cz.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982
- [3] Cempel Cz.: Tomaszewski F.: *Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań*, Radom 1992
- [4] Engel Z.: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, PWN, Warszawa 1993
- [5] Kuczewski S.: *Wentylatory promieniowe. Teoria i podstawy projektowania*, Wydawnictwo Naukowo- Techniczne, Warszawa 1966
- [6] PN-ISO 5801:2008, *Wentylatory przemysłowe - Badanie charakterystyk działania na stanowiskach znormalizowanych*.

## 8. ZAŁĄCZNIK – PRZELICZNIK JEDNOSTEK CIŚNIENIA

Przelicznik podano za stroną [www.lwcad.republika.pl/jedn/jedn\\_cisn.htm](http://www.lwcad.republika.pl/jedn/jedn_cisn.htm)

### Przeliczanie jednostek Ciśnienia

Ciśnienie	Jednostki
1.000000	[Pa]
=	
1.000000	[Pa] - paskal ( pascal )
0.000001	[MPa] - megapaskal ( megapascal )
0.000010	[bar] - bar
0.000010	[atm] - atmosfera fizyczna ( atmosphere )
0.101972	[kG/m <sup>2</sup> ] - kilogram-siła na metr kwadratowy ( kilogram-force per square meter )
0.000010	[kG/cm <sup>2</sup> = at] - kilogram-siła na centymetr kwadratowy = = atmosfera techniczna ( kilogram-force per square centimeter )
1.019716e-7	[kG/mm <sup>2</sup> ] - kilogram-siła na milimetr kwadratowy ( kilogram-force per square millimeter )
10.000000	[dyn/cm <sup>2</sup> ] - dyna na centymetr kwadratowy (baria) ( dyne per square centimeter )
0.007501	[mmHg = Tr] - milimetr słupa rtęci = Tor ( millimeters of mercury = torr )
0.101972	[mmH <sub>2</sub> O] - milimetr słupa wody ( millimeters of water )
0.000145	[PSI] - Funt-siła na cal kwadratowy ( pounds-force per square inch )