

WYZNACZENIE PRZYBLIŻONEJ CHARAKTERYSTYKI AKUSTYCZNEJ WENTYLATORA PROMIENIOWEGO

WSTĘP

Akustyka maszyn oraz systemów w których maszyny te pracują jest jednym z najważniejszych parametrów wpływających na ich jakość, a co za tym idzie na właściwy standard pomieszczeń, w których się znajdują. Dlatego już na etapie projektowania instalacji, należy zwrócić uwagę na parametry akustyczne (prawnie regulowane), które są nie mniej ważne niż wielkości przepływowe.

Jak powszechnie wiadomo wentylator jest głównym źródłem hałasu w instalacji wentylacyjnej. Problem hałasu wytwarzany przez wentylator jest bardzo istotny i w związku z tym wymaga wy tłumaczenia.

Hałas pochodzący od pracy wentylatora zależy od wielu czynników. Podstawowym czynnikiem jest jego konstrukcja, w której należy zwrócić uwagę na liczbę łopatek oraz ich kształt. Następnymi czynnikami są wydajność i ciśnienie, prędkość powietrza, a także wielkość i kształt obudowy oraz jej sztywność. Przyczyną powstawania dźwięków w wentylatorze są drgania mechaniczne wynikające z ruchu elementów (łożyska, silnik napędowy, przekładnie) oraz hałas aerodynamiczny, wywołany przepływem powietrza. Decydujące znaczenie ma szerokopasmowy hałas aerodynamiczny, który spowodowany jest wirowaniem wirnika oraz turbulencjami i wirami w przepływie. Ponadto, hałas wytwarzany przez wentylator wykazuje charakter tonalny. Oznacza to, że znaczna część energii akustycznej emitowana jest w pewnej charakterystycznej częstotliwości, tzw. częstotliwości łopatkowej.

$$f = \frac{n \cdot z}{60} [Hz]$$

W wielu punktach przestrzeni wentylatora tworzą się wiry. Na ściankach kanałów międzyłopatkowych i obudowy spiralnej, powstają oderwania strumieni wypełniające się wirami przesuwanymi następnie do innych obszarów wirnika, w których dochodzi do zderzenia ze strugami głównymi. Efektem tego jest powstawanie fal akustycznych.

PODSTAWY AKUSTYKI

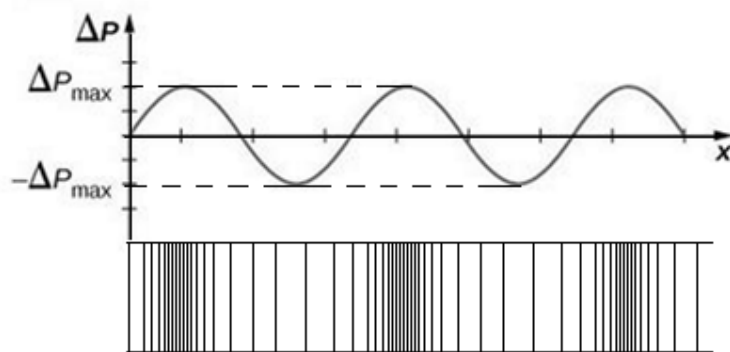
Hałasem określa się wszelkie niepożądane, nieprzyjemne, uciążliwe lub szkodliwe drgania ośrodka sprężystego, oddziałującego za pośrednictwem powietrza na narząd słuchu i inne (np. wewnętrzne).

Fala akustyczna to podłużna fala zagęszczeń i rozrzedzeń ośrodka, spowodowana drganiem jego cząsteczek, może się ona rozchodzić w ciałach stałych,

cieczach i gazach. Drgające cząsteczki ośrodka powodują zmianę jego gęstości (ciśnienia) bez zmiany ich średniego położenia.

Falą akustyczną nazywa się zarówno falę, która powoduje wrażenie słuchowe, jak i fale o częstotliwościach i amplitudach przekraczających zakres ludzkich zmysłów.

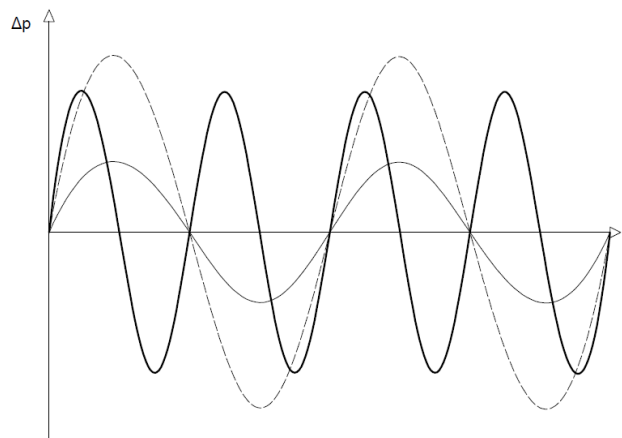
Źródłem dźwięków słyszalnych są ciała wprawione w drgania, których energia jest dostateczna, aby wywołać w naszym organie słuchu (uchu), najłagodniejsze wrażenia słuchowe. Oznacza to, że natężenie dźwięków słyszalnych musi przekraczać próg słyszalności.



Rys. 1. Fala akustyczna

Fala akustyczna to podłużna fala zagęszczeń i rozrzedzeń cząsteczek ośrodka, w którym się rozprzestrzenia bez zmiany ich średniego położenia. Oznaczając przez zagęszczenie kresek wzrost ciśnienia o Δp , a przez rozrzedzenie kresek jego zmniejszenie (jakie następuje podczas przechodzenia fali), możemy uwidocznić przebieg zmian ciśnienia powietrza, które dociera do naszego ucha jako ton.

Inaczej, ton to sinusoidalny przebieg fali akustycznej, a **zbiór tonów to dźwięk, rys.2.**



Rys. 2. Zbiór tonów – dźwięk

Każda fala akustyczna, niesie ze sobą pewną porcję energii, która odniesiona do jednostki czasu jest mocą akustyczną

$$\Delta N = \frac{\Delta E}{\Delta t} [W]$$

Moc akustyczna odniesiona do pola, przez które przechodzi dźwięk jest natężeniem dźwięku.

$$I = \frac{\Delta N}{\Delta s} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Człowiek reaguje na fale dźwiękowe, których częstotliwość mieści się w granicach od 20 do 20 000 Hz a największa jego wrażliwość jest w zakresie od 1000 Hz do 4000 Hz. Ucho ludzkie jest najbardziej czułe dla częstotliwości około 3000 Hz. Jego czułość maleje w miarę przesuwania się zarówno w kierunku wyższych jak i niższych częstotliwości.

Słyszalności ucha ludzkiego przyjmuje się w odniesieniu do częstotliwości 1000 Hz. Próg słyszalności dla tej częstotliwości odpowiada natężeniu $I_0 = 10^{-12} W/m^2$. Natężenie to stanowi wzorzec względem którego określamy natężenie innych tonów (dźwięków). Przeciwnieństwem progu słyszalności jest próg bólu, którego natężenie dźwięku wynosi $I = 50 W/m^2$. Dźwięki o takim natężeniu odbierane są jako uczucie bólu. To samo można przedstawić w postaci zmiany ciśnienia akustycznego, wyrażonego w Pa . W tym wypadku mamy odpowiednio $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$ oraz $p \cong 28 Pa$. Jak widać z powyższych wartości, zakres natężenia dźwięku jak również ciśnienia akustycznego jest bardzo szeroki (wynosi odpowiednio 10^{13} oraz 10^6). W związku z tym jest niezbyt wygodny do posługiwania, dlatego dla uzyskania prostych wielkości liczbowych, wprowadzono pojęcie poziomu natężenia dźwięku oraz poziomu ciśnienia akustycznego. Jednostką w obu tych przypadkach jest bel (B), ale w praktyce używa się jednostki 10 razy mniejszej tj. decybel (dB).

Mówimy, że poziom natężenia danego dźwięku wynosi n – *beli* jeżeli jego natężenie jest 10^n razy większe od natężenia progu słyszalności.

$$I = I_0 \cdot 10^n$$

$$\frac{I}{I_0} = 10^n$$

$$n \log 10 = \log \frac{I}{I_0}$$

$$n = \log \frac{I}{I_0} = L$$

$$L = \log \frac{I}{I_0} [B]$$

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} [dB]$$

gdzie:

I – natężenie dźwięku w danym punkcie środowiska

I_0 – natężenie odniesienia, które w przybliżeniu odpowiada dolnej granicy słyszalności przy częstotliwości 1000 Hz

Ze względu na proporcjonalność, natężenia dźwięku do kwadratu ciśnienia akustycznego można napisać, że:

$$I \approx p^2$$

$$L = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} [dB]$$

i w tym przypadku mówimy o poziomie ciśnienia akustycznego.

gdzie:

p – ciśnienie akustyczne w danym punkcie środowiska

p_0 – ciśnienie odniesienia, które w przybliżeniu odpowiada dolnej granicy słyszalności przy częstotliwości 1000 Hz

Ze względu na ograniczone możliwości ucha ludzkiego, w praktyce akustycznej przy ocenie wrażliwości człowieka na hałas posługujemy się wielkością, którą jest poziom dźwięku w skali A (ozn. L_A). Parametr ten uwzględnia właściwości ucha, co w praktyce oznaczają, że ustawiając miernik na zakres pomiarowy L_A (*filtr korekcyjny A*) **mierzymy hałas słyszalny przez ucho ludzkie**. Filtr ten najlepiej przystosowuje charakterystykę przyrządu do wrażliwości ucha, gdyż obniża poziom ciśnienia akustycznego dla małych częstotliwości o około 60 dB oraz dużych częstotliwości o około 10 dB. Wielkością, którą pomija sprawność ucha ludzkiego, a którą również należy wyznaczyć jest poziom ciśnienia akustycznego ozn. L_{LIN} . W tym przypadku mamy na myśli cały zakres mierzonego hałasu, zarówno ten słyszalny, jak i nie słyszalny przez człowieka. Aby go pomierzyć należy ustawić miernik na zakres pomiarowy L_{LIN} (*filtr korekcyjny C*).

Hałas kilku źródeł

Jeżeli mamy kilka źródeł dźwięku, to poziom natężenia w takim polu wynosi

$$\bar{L}_A = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} [dB]$$

gdzie L_i to poziom natężenia i – tego źródła dźwięku.

Dwa jednakowe źródła dźwięku $L_1 = 80 \text{ dB}$ i $L_2 = 80 \text{ dB}$ dają sumaryczny poziom natężenia dźwięku równy

$$\bar{L}_A = 10 \log(10^{0,1 \cdot 80} + 10^{0,1 \cdot 80}) = 83 \text{ dB}$$

Niezależnie od wartości poziomu dźwięku dwa jednakowe źródła dają zawsze sumaryczny poziom \bar{L} wyższy o 3 [dB] od poziomu dźwięku źródła pojedynczego.

Dla większej ilości jednakowych źródeł, sumaryczny poziom wynosi;

- dla 3 źródeł

$$\bar{L}(3) = L_i + 5 \text{ dB}$$

- dla 4 źródeł

$$\bar{L}(4) = L_i + 6 \text{ dB}$$

- dla 10 źródeł

$$\bar{L}(10) = L_i + 10 \text{ dB}$$

Zasady sumowania poziomu dźwięku obowiązują dla poziomu ciśnienia i poziomu mocy akustycznej.

Analiza spektralna hałasu – widmo akustyczne

Pomiar poziomu ciśnienia akustycznego pozwala na dokonanie jedynie wstępnej oceny określonego dźwięku złożonego. Bardziej szczegółową ocenę szkodliwego wpływu dźwięku na słuch oraz dane wyjściowe do opracowania sposobów zmniejszenia tego poziomu można uzyskać przez analizę poszczególnych składowych tego dźwięku. Analizę taką wykonuje się określając na podstawie pomiarów poziomy ciśnienia akustycznego kolejno w poszczególnych węższych pasmach częstotliwości, a więc np. pasmach o szerokości jednej, pół lub jednej trzeciej oktawy. Można napisać, że stosunek dwóch tonów granicznych dla oktawy wynosi $f_2/f_1 = 2$ dla pół oktawy $f_2/f_1 = \sqrt{2}$ dla jednej trzeciej $f_2/f_1 = \sqrt[3]{2}$. Zazwyczaj poszczególne pasma określa się wartością częstotliwości środkowej danego pasma obliczonej ze wzoru:

$$f_{sr} = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

Całkowity poziom ciśnienia akustycznego danego dźwięku złożonego jest oczywiście większy od poziomu ciśnienia akustycznego w poszczególnych pasmach częstotliwości tego dźwięku.

Wyznaczając charakterystykę wentylatora okazuje się, że najniższy hałas wentylatora jest w jego optymalnym punkcie pracy. Wartość tego hałasu można jednak jeszcze obniżyć poprzez eliminację zakresu częstotliwości, który posiada najwyższą wartość L_{LIN} . Jak wiadomo na dźwięk składają się tony o różnych częstotliwościach i odpowiadających im poziomach ciśnienia akustycznego. Przedstawione jest to na wykresie widma akustycznego (rys.4), które pokazuje odpowiednie L_{LIN} w kolejnych zakresach częstotliwości, i dotyczy optymalnego punktu pracy maszyny.

Widmo ciśnienia akustycznego określa poziom wartości ciśnienia akustycznego w całym zakresie częstotliwości, czyli od 16 – 16000 Hz. W praktyce zupełnie wystarczające jest pasmo od 40 – 8000 Hz. Spektra pasmowe znajdują zastosowanie do doboru tłumików akustycznych, które ewentualnie wyeliminują najbardziej uciążliwy zakres częstotliwości.

Pomimo, że podział częstotliwości nie jest równomierny, to do sporządzenia wykresów stosuje się skalę długości stałą dla wszystkich pasm widma.

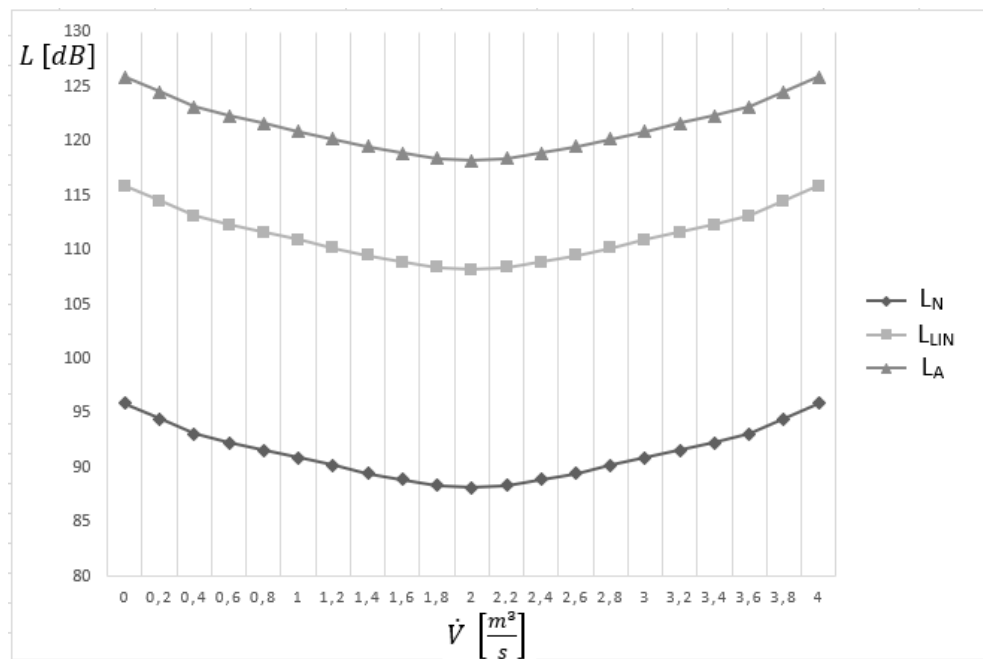
WYKONANIE ĆWICZENIA

Cel ćwiczenia

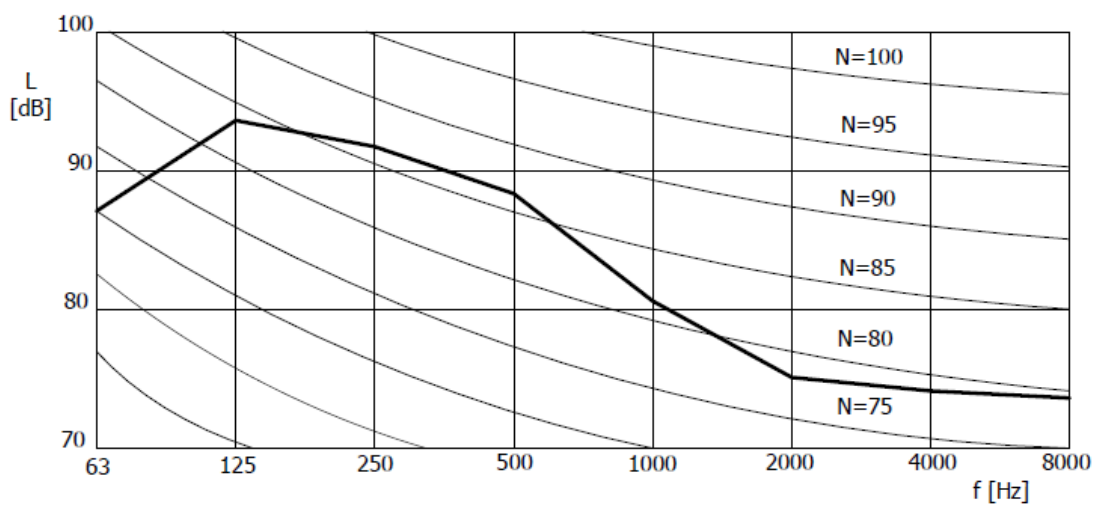
Celem ćwiczenia jest wyznaczenie przybliżonej charakterystyki akustycznej wentylatora promieniowego, na którą składają się następujące zależności:

- $L_A = f(\dot{V})$ przybliżony poziom dźwięku w funkcji wydajności objętościowej,
- $L = f(\dot{V})$ przybliżony poziom ciśnienia akustycznego w funkcji wydajności,
- $L = f(Hz)$ przybliżonego widma ciśnienia akustycznego w optymalnym punkcie pracy.

Zależności te wyznacza się na podstawie pomiarów przynajmniej w pięciu punktach pracy wentylatora i odnosi do warunków normalnych. $L [dB]$

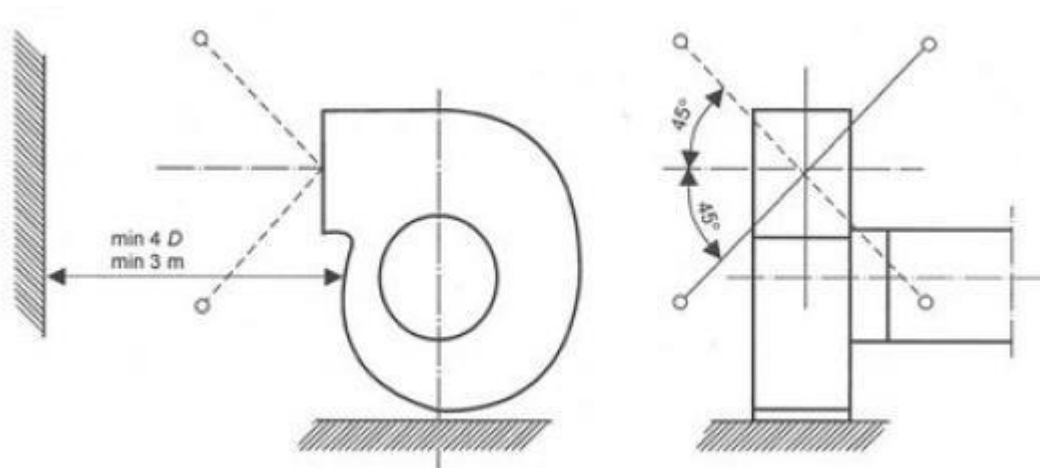


Rys. 3. Zależność poziomu mocy L_N , ciśnienia akustycznego L_{LIN} oraz poziomu dźwięku L_A od wydajności



Rys. 4. Widmo akustyczne wentylatora

Przybliżona charakterystyka obejmuje wyznaczenie poziomu ciśnienia akustycznego $L_{(LIN)}$ i poziomu dźwięku L_A w kilku punktach pracy wentylatora oraz widma hałasu w pobliżu punktu optymalnego. Pomiary można wykonywać na wentylatorze w miejscu zainstalowania, dlatego bywa stosowana do sprawdzenia parametrów ruchowych. Oczywiście muszą być spełnione wymagania normy dotyczące minimalnej odległości okna wylotowego od powierzchni odbijającej dźwięk, rys. poniżej.



Rys. 5. Rozmieszczenie pkt. pomiarowych przy wyznaczaniu charakterystyki.

Promienie pomiarowe należy przyjmować równe 1 m dla średnicy wlotu i wylotu $D \leq 1$ m. Gdy średnica $D > 1$ m, wówczas promień jest równy średnicy. Cztery punkty usytuowania mikrofonu należy rozmieścić tak, aby promienie łączące je ze środkiem promieniowania tworzyły z osią wylotu kat 45° . Odczyt z czterech punktów pomiarowych należy uśrednić według zasady arytmetycznej

$$L_{\text{śr}} = \left(\frac{1}{n}\right) (L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n)$$

Jako wynik pomiarów akustycznych przyjmuje się wartości średnie ze zmierzonych w kilku punktach pracy wentylatorów poziomów akustycznych i poziomów dźwięku (z uwzględnieniem poprawki na poziom tła). Poprawkę uwzględnia się, gdy różnica pomiędzy poziomem ciśnienia wentylatora i tła jest w granicach od 4 do 9,5 dB. Minimalny poziom tła powinien być większy niż 4 dB od poziomu źródła w każdej oktawie, a wtedy poprawkę dobiera się z normy [4].

Gdy różnica jest mniejsza, nie można wykonać pomiaru. Jeżeli przekracza 10 dB, nie trzeba jej uwzględniać.

Oprócz wielkości akustycznych, należy zmierzyć wydajność wentylatora, kontrolując jednocześnie obroty, które muszą być stałe.

Strumień przepływającego powietrza liczy się wg. następującej zależności:

$$\dot{V} = 0,133 \sqrt{\Delta p} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$\Delta p = \rho_m \cdot g \cdot \Delta h$$

gdzie: ρ_m – gęstość cieczy manometrycznej

Dla warunków pracy wentylatora znacznie odbiegających od normalnych, parametry akustyczne przelicza się do warunków normalnych zgodnie z [4]. Nie trzeba dokonywać przeliczeń, gdy obroty wentylatora i gęstość powietrza spełniają następujące warunki:

$$0,95 n_{zn} < n < 1,05 n_{zn}$$

$$0,9 \rho_N < \rho < 1,1 \rho_N$$

gdzie : n_{zn} – obroty znamionowe , [obr/min]

ρ_N – gęstość w warunkach normalnych, [kg/m³]

Wyniki pomiarów należy ująć w tabelach 2 i 3. Następnie należy wykreślić zależności jakie pokazano na rys.1 i 2. Na wykres widma akustycznego należy nanieść krzywą N , która służy jako kryterium oceny hałasu emitowanego przez maszynę w optymalnym punkcie. Widmo hałasu badanej maszyny powinno leżeć poniżej krzywej $N = 85$. Wskaźniki oceny hałasu N dla pasma oktawowego o częstotliwości środkowej 1000 Hz jest liczbowo równy poziomowi ciśnienia akustycznego w decybelach w tym paśmie. Wskaźniki w innych pasmach oblicza się ze wzoru:

$$L = a + b \cdot N \text{ [dB]}$$

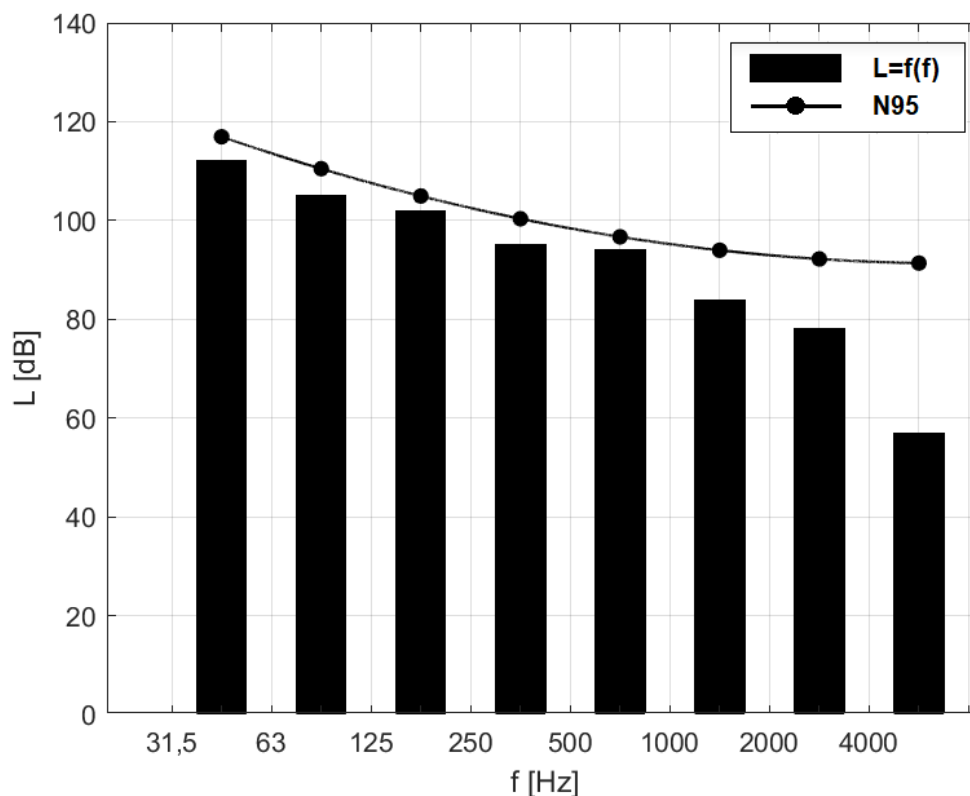
gdzie: N – wskaźnik oceny hałasu dla oktawy 1000 Hz,

a, b – stałe dobierane z tabeli 1

Tab. 1. Wartość współczynników a i b do określenia krzywych oceny hałasu N

Częstotliwość [Hz]	a	b
63	35,5	0,79
125	22,0	0,87
250	12,0	0,93
500	4,8	0,974
1000	0	1,0
2000	-3,5	1,015
4000	-6,1	1,025
8000	-8,0	1,03

Aby określić, czy dany hałas przewyższa poziom przyjętego kryterium oceny, należy na zmierzone widmo akustyczne nanieść krzywą N , której punkty oblicza się według powyższego wzoru. Widmo hałasu (rys.6) badanej maszyny powinno leżeć poniżej krzywej $N = 85dB$. Z widma akustycznego widać, który zakres częstotliwości jest dominujący czyli w konsekwencji, który należałoby wytłumić.



Rys. 6. Widmo akustyczne w optymalnym pkt. pracy

Wentylatory muszą spełniać dopuszczalne wartości L poziomu ciśnienia i L_A poziomu dźwięku uzależnione od przeznaczenia i miejsca zainstalowania lub mieścić się w klasie hałaśliwości ustalonej w oparciu o rodzaj wentylatora i miejsce zastosowania. Rozróżnia się pięć klas hałaśliwości: 0,1,2,3,4

TABELE POMIAROWE

Tab. 2. Tabela pomiarowa L_{LIN} i L_A

Lp.	Ciśnienie różnicowe Δh [mm alkoholu]	Wydajność \dot{V} [$\frac{m^3}{s}$]	Pomiar L_{LIN} , L_A					
				1	2	3	4	L_{sr}
1.			L_{LIN}					
			L_A					
2.			L_{LIN}					
			L_A					
3.			L_{LIN}					
			L_A					
4.			L_{LIN}					
			L_A					
5.			L_{LIN}					
			L_A					
6.			L_{LIN}					
			L_A					

Tab. 3. Tabela pomiarowa widma akustycznego

$\Delta h =$	Hz					kHz				
Pasmo	31,5	63	125	250	500	1	2	4	8	16
Poziom ciśnienia L										

Tab. 4. Tabela obliczeniowa parametrów akustycznych

Typ wentylatora				Data						
Lp.	Nazwa wielkości obliczeniowej	Oznaczenie	Jednostka	Pomiar						
				1	2	3	4	5	6	
1.	Wydajność	\dot{V}	m ³ /s							
2.	Spiętrzenie całkowite	ΔP_c	Pa							
3.	Poziom ciśnienia akustycznego	L	dB							
4.	Poziom dźwięku	L_A	dB							

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia
2. Tabele pomiarowe
3. Tabele obliczeniowe
4. Wnioski

Literatura

1. Fortuna S.: Badanie wentylatorów i sprężarek, Kraków, AGH 1999
2. Fortuna S.: Wentylatory TECHWENT, Kraków 1999
3. Puzyna C.: Zwalczanie hałasu w przemyśle. Warszawa, WNT 1974
4. Polska Norma PN -72/M-43120. Wentylatory. Metody pomiaru hałasu.

Opracował : Wojciech Knapczyk