

Instrukcja do laboratorium z Fizyki Budowli

Temat laboratorium:
CZĘSTOTLIWOŚĆ

1. Wprowadzenie

1.1. Widmo hałasu

Płaską falę sinusoidalną można opisać następującym wyrażeniem:

$$p = p_0 \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (1)$$

p – chwilowa nadwyżka ciśnienia ponad ciśnienie atmosferyczne zwana ciśnieniem akustycznym [Pa]

p_0 – amplituda zmian ciśnienia akustycznego [Pa]

f – częstotliwość [Hz]

φ – kąt fazowy

Suma dwóch drgań sinusoidalnych jest prostą sumą składowych:

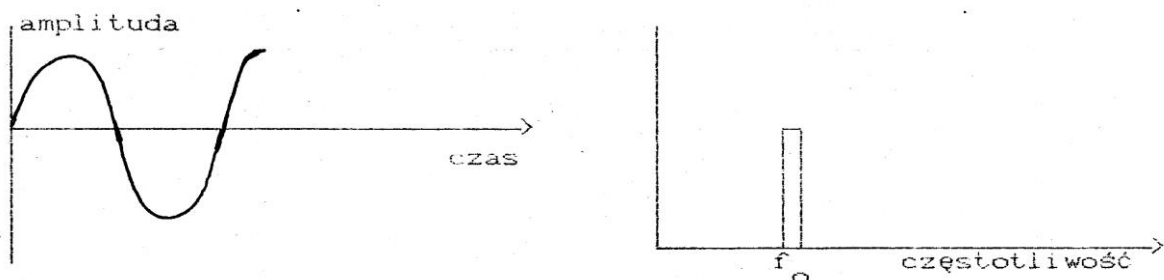
$$p_3 = p_1 + p_2 \quad (2)$$

$$p_1 = p_{01} \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1)$$

$$p_2 = p_{02} \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)$$

Każdą falę złożoną można rozłożyć na sumę prostych drgań zgodnie z zasadami teorii Fouriera, co nosi nazwę wyznaczenia widma drgań lub **analizy widmowej**. Charakterystyka częstotliwościowa (widmo) sygnału akustycznego, poziom natężenia dźwięku i czas ekspozycji to podstawowe parametry określające hałas.

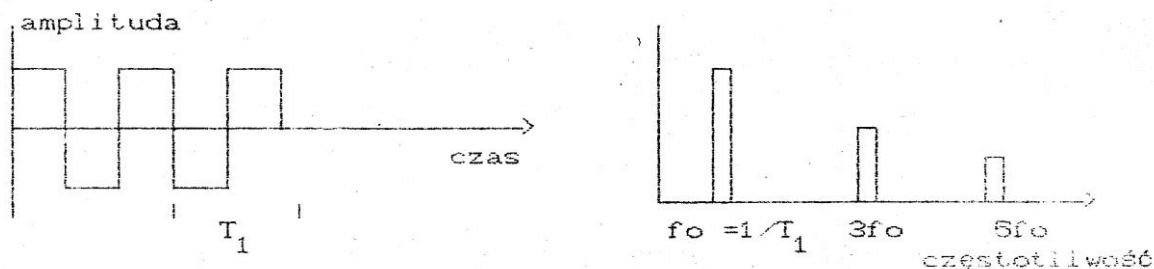
Z podanych wyżej zależności wynika, że drgania sinusoidalne charakteryzują się jedną wartością częstotliwości. W prezentacji widmowej (układ współrzędnych amplituda – częstotliwość) odpowiada to pojedynczemu prążkowi (Rys. 1). Sygnał taki nosi nazwę **tonu prostego**.



Rys. 1

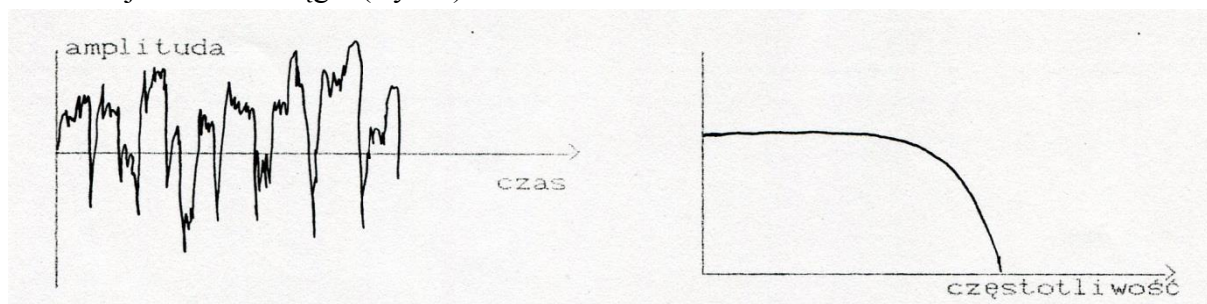
Drgania okresowe niesinusoidalne lub drgania poliharmoniczne charakteryzują się widmem wieloprążkowym, przy czym położenie prążków harmonicznym na osi częstotliwości, wyznaczone z rozkładu na szereg Fouriera jest równomierne, zwykle jest to wielokrotność częstotliwości podstawowej. Przykładem jest widmo drgań prostokątnych

(Rys. 2). Widmo takie nosi nazwę **widma harmonicznego**, a prążki $3f_0$, $5f_0$ harmonicznym składowej podstawowej.



Rys. 2

Przy pomiarach hałasu najczęściej spotykamy się z dźwiękami **nieokresowymi**. W uproszczeniu można powiedzieć, że stanowią one sumę nieskończenie dużej liczby dźwięków sinusoidalnych. W przestrzeni częstotliwości poszczególne prążki położone są tak gęsto, że obrazem jest widmo ciągłe (Rys. 3).



Rys. 3

1.2. Częstotliwość jako parametr akustyczny

Znaczenie częstotliwości jako parametru określającego hałas wynika między innymi z zależności między subiektywnym odczuciem głośności, a częstotliwością dźwięku (Rys. 4).

Głośność jest złożoną funkcją wielu parametrów ale zależy przede wszystkim od poziomu natężenia dźwięku i częstotliwości. Tony niskie są gorzej słyszalne niż częstotliwości w zakresie 1000Hz – 2000Hz. Informacje o charakterystyce częstotliwościowej potrzebne są zatem do oceny wpływu hałasu na organizm człowieka.

Współczynnik pochłaniania dźwięku α materiałów i ustrojów dźwiękochłonnych zależy również od częstotliwości. Oznacza to, że dobór tych materiałów przy wykonywaniu adaptacji akustycznych wewnątrz powinien uwzględniać charakterystykę widmową dźwięku.

Fale dźwiękowe na swej drodze napotykają różnorodne przeszkody w postaci budynków, ekranów akustycznych lub innych elementów, które powodują ugięcie i dobiecie fali. Przy analizie tych zjawisk należy brać pod uwagę stosunek długości fali do wymiarów geometrycznych przeszkody. Można przyjąć, że w przypadku gdy długość fali λ jest dużo większa od wymiarów przeszkody to fala jej „nie zauważa”. Gdy wielkości te są porównywalne następuje rozpraszanie energii akustycznej. Przy dużo większych od długości fali wymiarach przeszkody następuje kierunkowe odbicie energii akustycznej zgodnie z zasadą, że kąt padania jest równy kątowi odbicia.

Długość fali określona jest wzorem:

$$\lambda = c/f \quad (3)$$

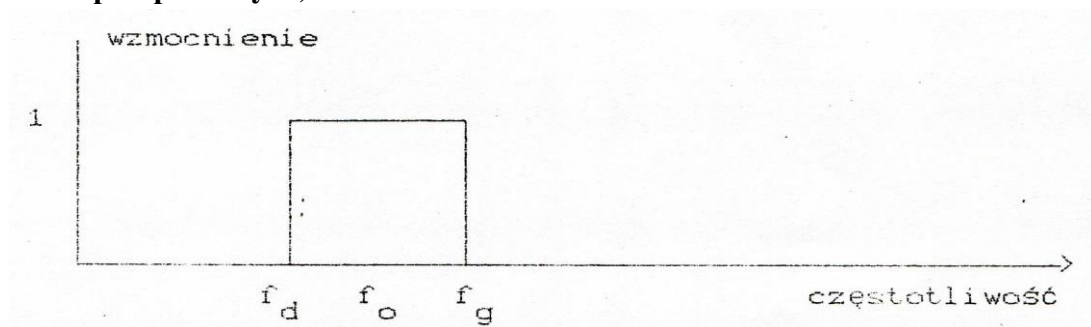
c – prędkość propagacji dźwięku [m/s] (w powietrzu $c = 340$ m/s)

f – częstotliwość [Hz]

Częstotliwości dźwięków słyszalnych zawierają się w granicach 20Hz – 20000Hz co odpowiada zakresowi długości fal 17m – 17mm. Oznacza to, że nie można analizować interakcji między przeszkodą a falą bez uwzględnienia częstotliwości.

1.3. Filtry akustyczne

Filtry i analizatory akustyczne pozwalają na drodze pomiarowej określić widmo sygnału dźwiękowego. Są to urządzenia elektroniczne, których wzmocnienie zależy od częstotliwości. Na Rys. 5 pokazano idealną charakterystykę **filtrów pasmowych (środkowoprzepustowych)**.



f_d – dolna częstotliwość graniczna

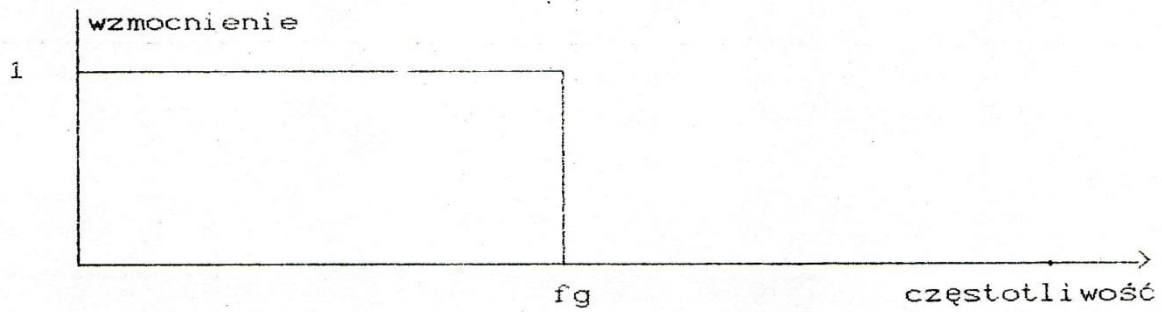
f_0 – częstotliwość środkowa filtru

f_g – górna częstotliwość graniczna

Rys. 5

Przy zastosowaniu filtru z Rys. 5 następuje całkowite wytłumienie częstotliwości mniejszych od f_d i większych od f_g . Składowe sygnału spełniające zależność $f_d < f < f_g$ przejdą przez filtr ze wzmocnieniem równym 1.

Innym rodzajem filtru jest **filtr dolnoprzepustowy** (Rys. 6). Filtr ten działa jak sito przy analizie uziarnienia kruszyw, przepuszcza tylko częstotliwości niższe od pewnej wartości granicznej.



Rys. 6

W celu przeprowadzenia dokładnej analizy widmowej należałoby zastosować szereg filtrów pasmowych o częstotliwościach środkowych f_0 pokrywających zakres od 20Hz do 20000Hz. Oznacza to, że przy szerokości pasma np.: 10Hz ($f_g - f_d = 10\text{Hz}$) musimy stosować ok. 2000 filtrów. Żeby ułatwić pomiary, w laboratoriach akustycznych stosuje się inne rodzaje filtrów. Są to **filtry o stałej względnej szerokości pasma, najczęściej oktawowe lub tercjowe.**

Charakterystyka tych filtrów spełnia następującą zależność:

$$\frac{f_g - f_d}{f_0} = \text{const.} \quad (4)$$

Oznacza to, że pasmo określone różnicą $f_g - f_d$ wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości środkowej f_0 .

1.3.1. Filtry oktawowe

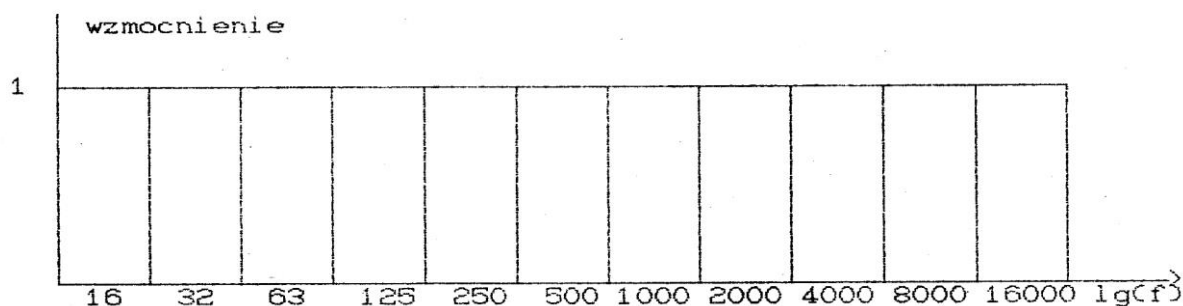
Częstotliwość środkowa określona jest zależnością:

$$\begin{aligned} f_0 &= (f_g f_d)^{1/2} \\ f_g &= 2f_d \\ f_0 &= (2f_d^2)^{1/2} = 1.41f_d \end{aligned} \quad (5)$$

Częstotliwości środkowe filtrów oktawowych (Rys. 7) wynoszą: 16, 32, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000Hz i pozwalają przeprowadzić analizę w zakresie częstotliwości słyszalnych. Częstotliwość f_d filtru wyższego pokrywa się z wartością f_g filtru niższego.

Względna szerokość pasma przepuszczania filtrów oktawowych określona jest zależnością:

$$\frac{f_g - f_d}{f_0} 100\% = \frac{2f_g - f_d}{(2)^{1/2}f_d} 100 = 70,7\% \quad (6)$$



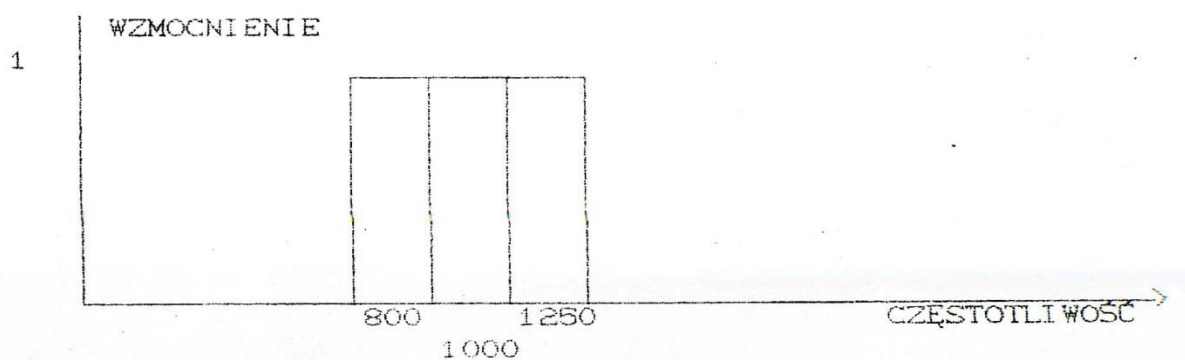
Rys. 7

1.3.2. Filtry tercjowe

Jeżeli każdy filtr oktawowy podzielimy na trzy filtry o środkowych częstotliwościach określonych przez zależność (5), lecz przy spełnieniu równości:

$$f_g = 2^{1/3} f_d \quad (7)$$

to otrzymamy ciąg filtrów tercjowych (1/3 oktawowych). Na każdy filtr oktawowy składają się trzy filtry tercjowe.



Rys. 8

Względna szerokość pasma przepuszczania filtrów tercjowych określona jest zależnością:

$$\frac{f_g - f_d}{f_0} 100\% = \frac{2^{1/3} f_d - f_d}{(2)^{1/5} f_d} 100 = 23,1\% \quad (8)$$

1.3.3. Filtry korekcyjne A, B, C

Jak już wspomniano wyżej głośność dźwięku zależy od częstotliwości. Na Rys. pokazane są **krzywe równej głośności**. Wynika z nich, że częstotliwości niskie są relatywnie gorzej słyszane niż wysokie. Charakterystyki częstotliwościowe **filtrów korekcyjnych** naśladują krzywe równej głośności, to znaczy w tym samym stopniu i w tym samym zakresie częstotliwości tłumią sygnał akustyczny co organ słuchu człowieka (Rys. 9). W związku z tym, że kształt krzywych równej głośności zależy od poziomu natężenia dźwięku

opracowano trzy rodzaje filtrów korekcyjnych A, B i C. Filtr A powinien być stosowany przy poziomach natężenia dźwięku od 0 do 55dB. W zakresie 55dB - 85dB należy stosować filtr B, a powyżej 85dB – filtr C. W praktyce przy ocenie hałasu, niezależnie od poziomu natężenia dźwięku, stosuje się tylko filtr A. Mówimy wtedy o pomiarze dźwięku A, wynik podajemy w dB(A).

Poziom dźwięku A może być określony na podstawie wyników analizy częstotliwościowej wykonanej w pasmach oktaowych. Obliczenia należy przeprowadzić zgodnie ze wzorem:

$$L(A) = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_i+K_i)} \quad (9)$$

L_i – poziom natężenia dźwięku w i-tym paśmie częstotliwości

n – liczba pasm częstotliwości

K_i – poprawka korygująca wg krzywej A (tablica I)

Tabela 1 – poprawki korekcyjne wg krzywej A

| | Częstotliwości środkowe pasm oktaowych [Hz] | | | | | | | | |
|---------------|---|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Paprawka [dB] | -39 | -26 | -16 | -9 | -3 | 0 | +1 | +1 | -1 |

1.4. Krzywe oceny hałasu

Jedną z metod oceny hałasu jest porównanie zmierzonej charakterystyki częstotliwościowej dźwięku z krzywymi oceny hałasu N (noise ratio). Nie jest to metoda obligatoryjna w świetle aktualnie obowiązujących przepisów normowych, które jako kryterium przyjmują równoważny poziom dźwięku A. Metoda ta ma jednak istotną zaletę z punktu widzenia projektowania w dziedzinie inżynierii akustycznej. Naniesienia wyników analizy częstotliwościowej na wykresy krzywych N pozwala zorientować się w jakim zakresie częstotliwości następuje przekroczenie wartości dopuszczalnych.

Oczywiście kryteria oceny hałasu muszą być określone przez liczbę N. Można z dobrym przybliżeniem przyjąć, że wielkość N odpowiada wartości wyrażonej w dB(A) pomniejszonej o 5. To znaczy, że dopuszczalny poziom dźwięku 85dB(A) odpowiada krzywej oceny hałasu N80. Analiza częstotliwościowa sygnału akustycznego musi być wykonana przy użyciu filtrów oktaowych.

Przykład

Obliczyć poziomy dźwięku A na podstawie zmierzonych charakterystyk częstotliwościowych (pasma oktaowe).

| | 63Hz | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1kHz | 2kHz | 4kHz | 8kHz |
|-----------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| Sygnal I | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 58 | 49 | 46 |
| Sygnal II | 45 | 47 | 57 | 60 | 70 | 73 | 73 | 72 |

Rozwiązanie:

Po uwzględnieniu poprawek K_i (tabela 1) należy dodać poziomy natężenia dźwięku w poszczególnych oktawach zgodnie z zasadami sumowania poziomów.

Sygnal I:

$$\begin{aligned}L_I(A) &= (100 - 26) + (90 - 16) + (80 - 9) + (70 - 3) + (60 - 0) + (58 + 1) \\ &\quad + (49 + 1) + (46 - 1) = 74 + 74 + 71 + 67 + 60 + 59 + 50 + 45 \\ &= 78dB(A)\end{aligned}$$

Sygnal II:

$$\begin{aligned}L_{II}(A) &= (45 - 26) + (47 - 16) + (57 - 9) + (60 - 3) + (70 - 0) + (73 + 1) \\ &\quad + (73 + 1) + (72 - 1) = 19 + 31 + 48 + 57 + 70 + 74 + 74 + 71 \\ &= 79dB(A)\end{aligned}$$

Sygnal I to hałas niskoczęstotliwościowy, natomiast w sygnale II przeważają składowe wysokoczęstotliwościowe mimo to poziom dźwięku wyrażony w dB(A) jest prawie taki sam.

Przykład

W jakim zakresie częstotliwości należy przede wszystkim obniżyć hałas technologiczny piły tarczowej, żeby dopuszczalna wartość 85dB(A) nie była przekroczona.

Widmo hałasu:

| | | | | | | |
|--------|-----|-----|-----|------|------|------|
| F [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| L [dB] | 75 | 80 | 82 | 90 | 90 | 93 |

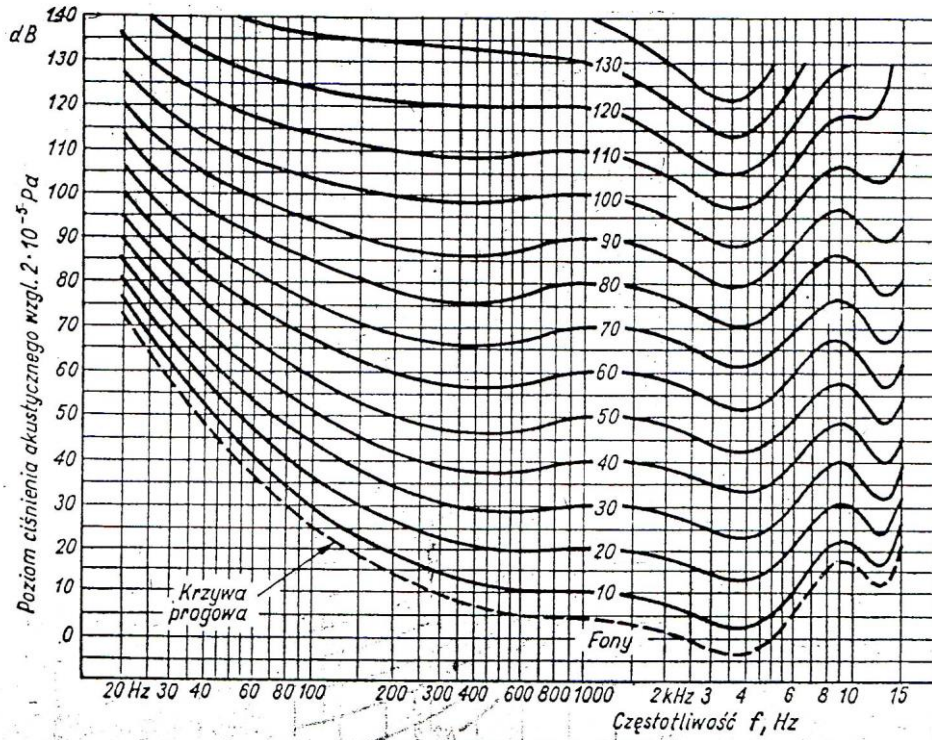
Dopuszczalny poziom dźwięku 85dB(A) odpowiada krzywej N80:

| | | | | | | |
|--------|-----|-----|-----|------|------|------|
| F [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| L [dB] | 92 | 87 | 83 | 80 | 78 | 76 |

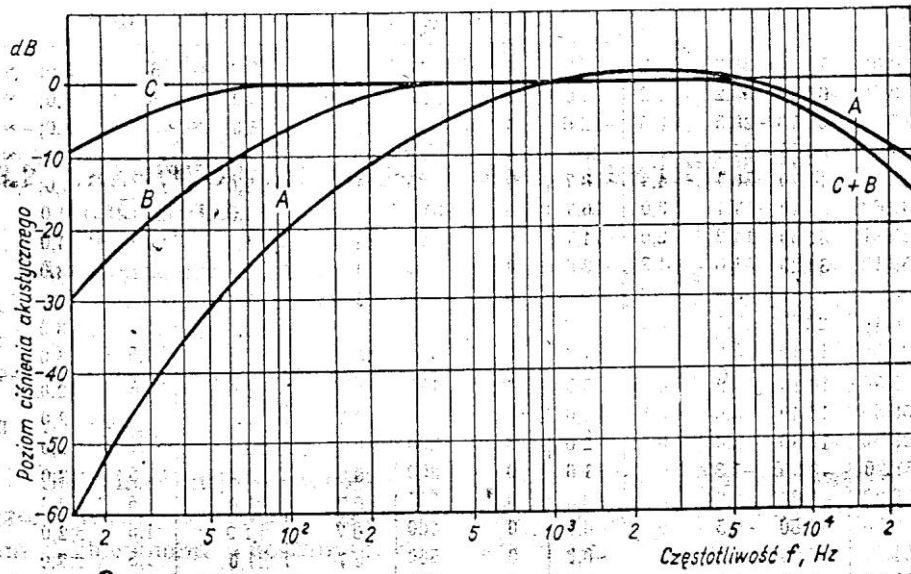
Przekroczenie wartości dopuszczalnych występuje w zakresie częstotliwości wyższych od 500Hz. Należy np.: stosować materiały o dużym współczynniku pochłaniania dźwięku w zakresie wysokich częstotliwości.

2. Program ćwiczenia

Należy przeprowadzić analizę częstotliwościową w pasmach tercjowych i oktaowych sygnałów zarejestrowanych na magnetofonie, zmierzyć liniowy poziom natężenia dźwięku i poziom dźwięku A. W przypadku hałasu obrabiarki porównać widmo z krzywą N80. Sprawozdanie powinno zawierać wyniki pomiarów (tabele i wykresy) oraz wnioski wynikające z analizy badanych sygnałów.



Rys. 4 Krzywe równej głośności dla tonów prostych



Rys. 9 Krzywe korekcyjne A,B,C