

# Laboratorium

## Wibroakustyczne Diagnozowanie Maszyn i Urządzeń

Instrukcja do ćwiczenia nr 6

**KOMORA BEZECHOWA I SEMIBEZECHOWA  
METODYKA POMIARU MOCY AKUSTYCZNEJ**

Opracowanie: P. Osiński, K. Leszczyński

## Wymagania jakie musi spełniać komora bezechowa i semibezechowa

Komora bezechowa (rys. 1) jest to zamknięte pomieszczenie, odizolowane od zewnętrznych zakłóceń akustycznych, sufit i podłoga są pokryte ustrojami dźwiękochłonnymi, zapewniające w tym pomieszczeniu warunki akustyczne zbliżone do warunków panujących w przestrzeni nieograniczonej. W komorze bezechowej praktycznie nie powinno występować nakładanie się fal emitowanych i odbijanych, warunki akustyczne zbliżone są do idealnego pola swobodnego. Pole takie jest w szczególności pożądane do wyznaczenia kierunkowości promieniowania badanego źródła dźwięku. Metody pomiaru w komorach bezechowych opisano w normie ISO 3745 [1].



Rys. 1. Komora bezechowa Microsoftu – najcichsze miejsce na Ziemi [2]

W komorze bezechowej nie można wykonywać pomiarów hałasów dużych i ciężkich obiektów. Nie pozwala na to konstrukcja podłogi, która wyłożona jest delikatnymi elementami tłumiącymi. Dlatego często spotyka się komory, w których podłoga jest wykonana z betonu, a tylko ściany i sufity są wyłożone materiałami i ustrojami dźwiękochłonnymi. Są to tzw. komory semibezechowe (częściowo odbijające dźwięk) (rys. 2 i 8). W takiej komorze pole akustyczne charakteryzuje się określoną kierunkowością, która jest wywołana odbiciem fali akustycznej od podłogi. W pobliżu powierzchni odbijającej dźwięk poziom ciśnienia akustycznego jest zawsze zwiększone, a wartość tego ciśnienia zależy od odległości  $x$  i długości fali  $\lambda$  [1]:

- dla  $x < 0,1\lambda$  moc zmierzona jest dwukrotnie większa (około 3dB) od mocy emitowanej przez źródło spowodowane to jest niejednorodnością pola akustycznego dla częstotliwości mniejszych od 1000Hz,
- dla  $x = 0,25 - 0,5\lambda$  moc zmierzona jest większa o około 1dB od mocy emitowanej przez źródło,
- jeżeli odległość od źródła do powierzchni jest większa niż długość fali dla  $x > \lambda$ , to obserwuje się tylko nieznaczny wpływ na wartość zmierzonego poziomu mocy emitowanej przez źródło.



Rys. 2. Komora semibezechowa na uniwersytecie w Seulu [3]

Metodę pomiaru hałasu w komorach częściowo odbijających dźwięk omówiono w normie ISO 3745.

Aby wystąpiły warunki pola swobodnego pomieszczenia badawcze powinno [4]:

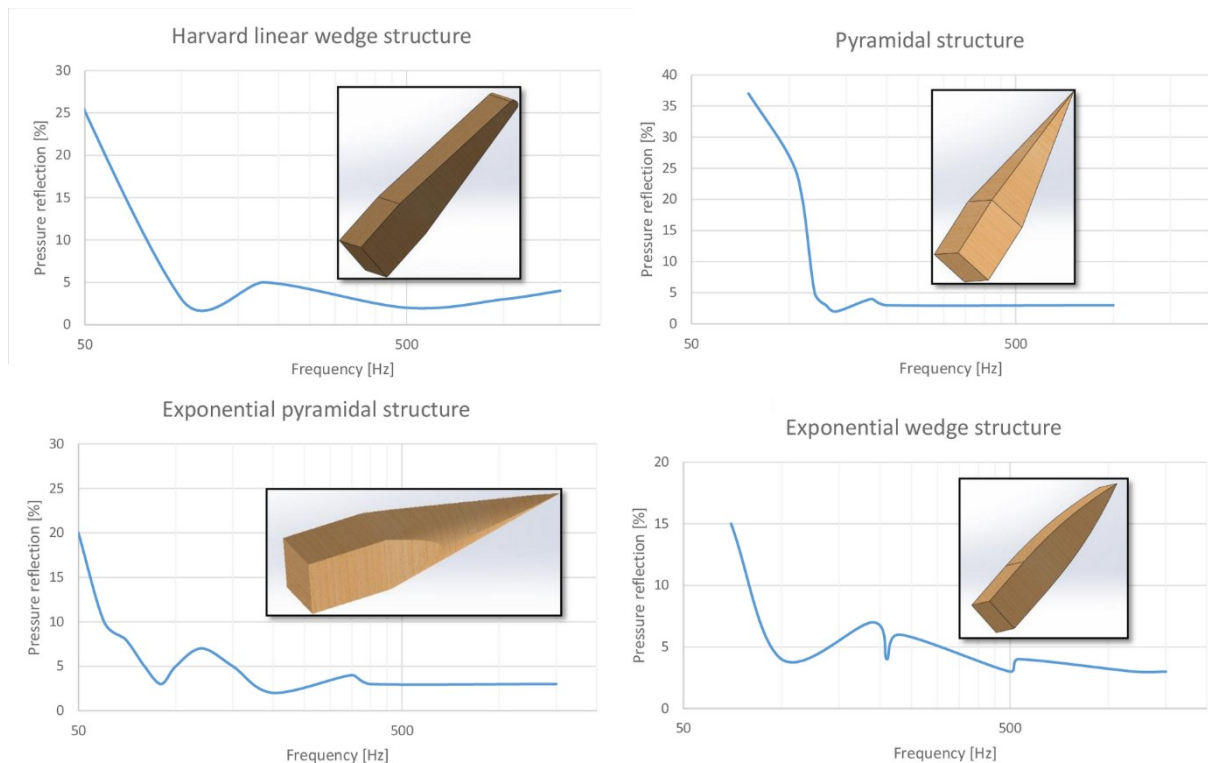
- mieć odpowiednią objętość

Objętość pomieszczenia powinna być co najmniej 200 razy większa niż objętość mierzonego źródła dźwięku.

- charakteryzować się dużym pochłanianiem dźwięku w badanym zakresie częstotliwości

Współczynnik pochłaniania dźwięku adaptacji ścian i sufitu przy prostym padaniu fali powinien być równy lub większy niż 0,99 w badanym zakresie częstotliwości. Klipy dźwiękochłonne powinny być równomiernie rozłożone na powierzchniach. W komorze bezdechowej powinna zostać zastosowana taka sama adaptacja ścian, podłogi i sufitu. Konstrukcja podłogi właściwa do tego typu komór to siatka z naprężonych linii wykonanych ze stali nierdzewnej o średnicy ok. 2,5mm, umieszczonych w odległości 2cm lub 5cm od siebie. W komorze semibezechowej podłoga (lub inna powierzchnia) powinna być wykonana jako twarda, gładka płaszczyzna, której współczynnik pochłaniania w kierunku prostym do powierzchni nie przekracza 0,06 w badanym zakresie częstotliwości. Adaptację powierzchni otrzymuje się z zastosowaniem klinów wykonanych z materiału dźwiękochłonnego (rys. 3), które zamocowane są na wewnętrznych ścianach komory i skierowane są do wnętrza pomieszczenia. Jeśli sam materiał absorbujący jest dobrze dobrany i zaprojektowany, to dźwięki o średniej i wysokiej częstotliwości są absorbowane. Jednak aby zapewnić pochłanianie energii dźwiękowej również w niskich częstotliwościach, klipy muszą posiadać specjalny kształt. Na przestrzeni lat testowano wiele różnych rodzajów klinów akustycznych. Na podstawie badań określono, że najlepsze właściwości tłumiące uzyskuje się dla absorberów piramidalnych i klinowych – te są obecnie najczęściej stosowane w komorach

semibezechowych. Ponadto w przypadku zastosowania kształtów klinowych, aby zmaksymalizować obszar absorpcji akustycznej, kliny montuje się tak, aby dwa sąsiednie były względem siebie obrócone o 90 stopni. Kliny mogą być zamocowane z zachowaniem niewielkiej przestrzeni między nimi. Całkowita głębokość adaptacji powinna przekraczać  $\lambda/4$ , gdzie  $\lambda$  to długość fali dźwięku o częstotliwości równej najniższej częstotliwości środkowej stosowanego pasma.



Rys. 3. Współczynnik odbicia dla różnych typów klinów [5]

- być wolne od powierzchni odbijających (prócz powierzchni odbijającej w komorach semibezechowych) i przeszkód innych niż te związane z badanym źródłem dźwięku

Wszystkie elementy i aparatura, które nie muszą być pozostawione w pomieszczeniu powinny być umieszczone poza komorą. Otwarte końce rur powinny być osłonięte lub wypełnione materiałem dźwiękochłonnym, w celu uniknięcia oddziaływania rezonansowego.

- charakteryzować się wystarczająco niskimi poziomami hałasu tła

Poziom hałas tła powinien być o co najmniej 10dB niższy niż poziom ciśnienia akustycznego wytwarzanego przez badane źródło (we wszystkich pozycjach mikrofonów i w każdym zakresie częstotliwości). Największy problem stanowią niskie częstotliwości. W celu zapewnienia odpowiedniego poziomu tła przy pomiarze niskich częstotliwości może być konieczne otoczenie komory masywną ścianą i umieszczenie całej konstrukcji na izolatorach drgań.

Dodatkowe kryteria jakie należy zapewnić podczas pomiarów to [4]:

- temperatura powietrza podczas wykonywania pomiarów powinna mieścić się w granicach 15-30°C;
- w przypadku pomiaru w innych niż wyżej wymienione temperaturach, w obliczeniach należy przyjąć poprawkę wpływu wilgotności;
- w dużych pomieszczeniach (ponad 200m<sup>3</sup>) konieczna może być korekcja pochłaniania dźwięku przez powietrze w zakresie wysokich częstotliwości;

- unikanie wpływu warunków środowiska mogących mieć niekorzystny wpływ na mikrofon pomiarowy, np. brak silnych pól elektrycznych lub magnetycznych, brak podmuchów powietrza wydostającego się z urządzeń pomiarowych lub mierzonych.

#### **Ustawienie źródła dźwięku [4]**

Sposób w jaki badane źródło dźwięku jest zainstalowane i pracuje ma duży wpływ na obliczoną moc akustyczną. Dlatego należy odpowiednio dobrać sposób jego zamocowania oraz warunki pracy podczas badań.

Badane źródło powinno być zamocowane lub posadowione tak jak podane jest w procedurze badania hałasu danego źródła. Jeśli takie wymagania nie istnieją to należy wykorzystać typowe warunki w jakich pracuje źródło i posadowić lub zamocować je w taki sposób. Ponadto należy zadbać, aby nie nastąpiły zmiany w promieniowaniu mocy akustycznej wynikające z układu stosowanego do mocowania badanego źródła. Wiele małych źródeł dźwięku, które same w sobie nie promieniują dźwięków o małych częstotliwościach, mogą przekazywać drgania na duże powierzchnie, które promieniują dźwięk o takich częstotliwościach.

Urządzenia ręczne podczas badania powinny być trzymane lub prowadzone za pomocą ręki. Jeśli badane źródło wymaga, aby posadowić je w czasie pracy to należy zadbać o układ mocujący o małych rozmiarach, który jednocześnie powinien być częścią badanego źródła. Należy opisać to w procedurze badania.

Urządzenia przeznaczone do mocowania na podstawie lub ścianie powinny być umieszczone na płaszczyźnie odbijającej dźwięk. Urządzenie, które w normalnych warunkach pracy posadowione jest na stole powinno być umieszczone na podłodze. W przypadku, kiedy stół lub podstawa są wymagane do pracy źródła dźwięku, należy posadowić na nich źródło.

Jeśli to możliwe, całe wyposażenie dodatkowe wymagane do pracy źródła, niebędące jego częścią, powinno być umieszczone poza pomieszczeniem badawczym. Takie elementy jak kanały powietrzne, przewody elektryczne, rury podłączone do badanego źródła mogą promieniować znaczący poziom energii akustycznej.

#### **Praca źródła podczas pomiarów**

Podczas pomiarów należy stosować warunki pracy określone w odpowiedniej (tzn. dla badanego rodzaju maszyn i urządzeń) procedurze badania hałasu. Jeśli taka procedura nie istnieje, źródło powinno pracować w sposób jak najbardziej zbliżony do tego w jaki pracuje podczas normalnego użytkowania. W takim przypadku należy wybrać jeden lub kilka warunków pracy źródła:

- określone warunki obciążenia i pracy;
- pełne obciążenie (jeśli różni się od określonego wyżej);
- bez obciążenia (bieg jałowy);
- warunki pracy reprezentatywne dla normalnego użytkowania odpowiadające maksymalnej emisji dźwięku;
- symulowane obciążenie w ściśle określonych warunkach;
- warunki pracy odpowiadające charakterystycznemu cyklowi pracy.

Poziom mocy akustycznej źródła może być wyznaczony, dla każdego z różnych warunków pracy (np. obciążenia, prędkości urządzenia, temperatury). Warunki przeprowadzania badań powinny być ustalone z góry i utrzymywane na stałym poziomie przez cały czas trwania badania.

W przypadku symulowanych warunków pracy źródła ich wybór powinien umożliwić uzyskanie poziomów mocy akustycznej odpowiadających normalnemu użytkowaniu badanego źródła.

## Pomiary poziomu ciśnienia akustycznego [4]

Komora bezechowa i semibezechowa zapewniają najkorzystniejsze środowisko badawcze o najmniejszej niepewności pomiaru.

### Powierzchnia pomiarowa

Przy pomiarach w komorach bezechowych stosuje się powierzchnię pomiarową w kształcie kuli. Powierzchnia kuli powinna mieć swój środek w akustycznym środku źródła dźwięku. Jednak położenie środka akustycznego źródła dźwięku jest zwykle nieznane, dlatego przyjmuje się go najczęściej w środku geometrycznym źródła i zaznacza to w sprawozdaniu z badań. Promień kulistej powierzchni pomiarowej powinien być równy lub większy niż każda z podanych wielkości:

- dwukrotności największego wymiaru źródła;
- $\lambda/4$  odpowiadającej najniższej przyjętej w pomiarach częstotliwości;
- 1m.

W przypadku źródeł o niewielkich wymiarach i małym poziomie hałasu, mierzonych w ograniczonym zakresie częstotliwości, promień kulistej powierzchni pomiarowej może być mniejszy niż 1m, ale nie mniejszy niż 0,5m. Należy to zaznaczyć w sprawozdaniu z badań.

W komorach semibezechowych stosuje się półkuliste powierzchnie pomiarowe. Powierzchnia ta powinna mieć środek na podłodze w miejscu rzutu akustycznego środka źródła dźwięku lub, jeśli położenie tego środka nie jest znane, w np. miejscu rzutu środka geometrycznego źródła. Promień półkulistej powierzchni pomiarowej powinien być równy lub większy niż każda z podanych wielkości:

- dwukrotności największego wymiaru źródła
- potrójnej odległości akustycznego środka źródła od jego rzutu na powierzchnię odbijającą;
- $\lambda/4$  odpowiadającej najniższej przyjętej w pomiarach częstotliwości;
- 1m.

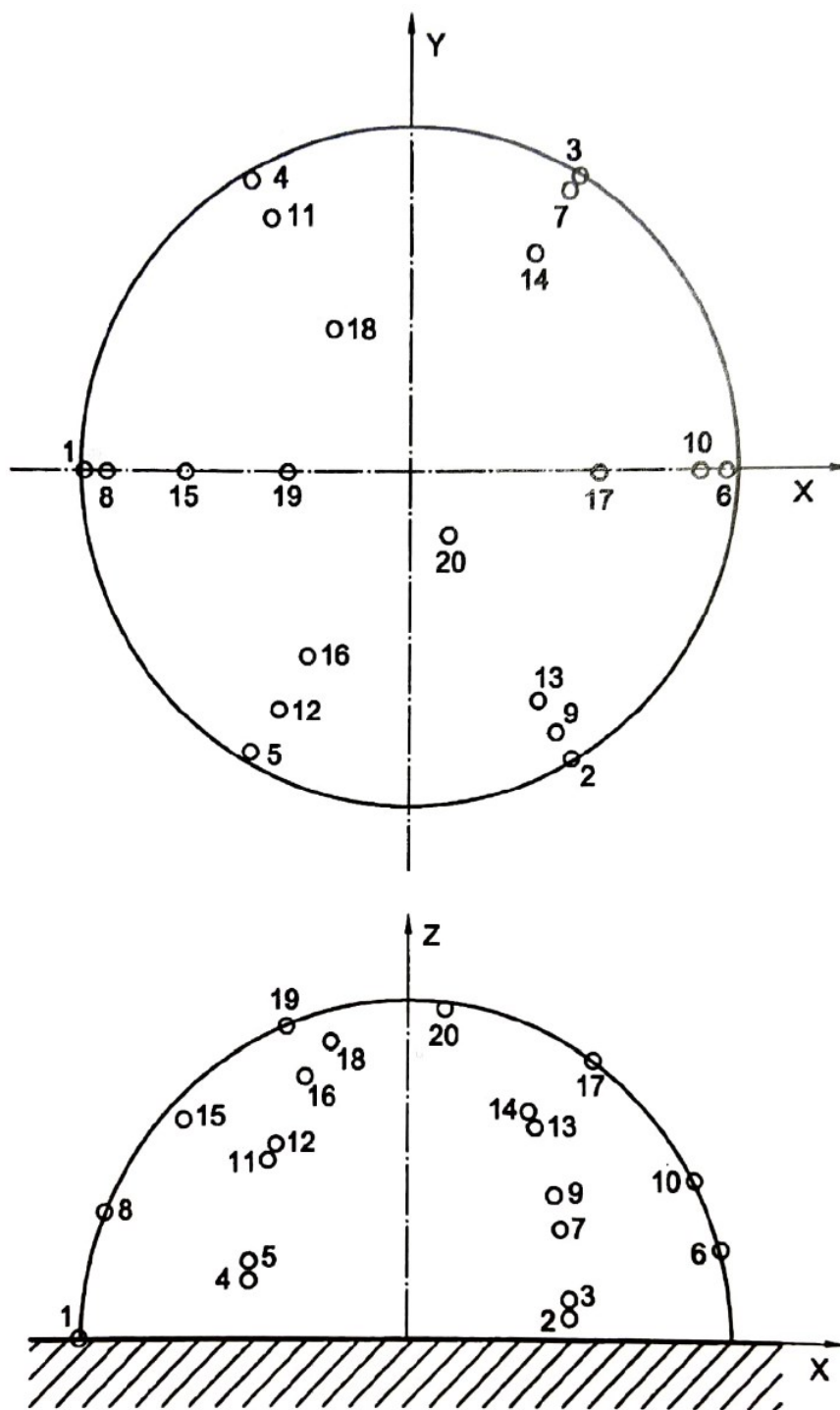
W przypadku źródeł o niewielkich wymiarach i małym poziomie hałasu, mierzonych w ograniczonym zakresie częstotliwości, promień kulistej powierzchni pomiarowej może być mniejszy niż 1m, ale nie mniejszy niż 0,5m. Należy to zaznaczyć w sprawozdaniu z badań.

### Pozycje mikrofonów

Do wyznaczenia powierzchniowego poziomu ciśnienia akustycznego na kulistej lub półkulistej powierzchni pomiarowej należy stosować jeden z czterech opisanych niżej sposobów:

- Układ stałych pozycji mikrofonów przy ich położeniu na powierzchni kuli lub półkuli pomiarowej. W tym celu pojedynczy mikrofon może być przemieszczany kolejno z jednej pozycji do drugiej lub można stosować pewną liczbę mikrofonów umieszczonych w ustalonych położeniach, a ich sygnał odczytywać kolejno lub jednocześnie.

Należy stosować 20-punktowy układ pozycji mikrofonu (dla komory semibezechowej zgodnie z rysunkiem 4). Liczba pozycji mikrofonu jest wystarczająca, jeśli różnica (w dB) między najwyższym i najniższym poziomem ciśnienia akustycznego w każdym z pasm częstotliwości pomiarowych i w każdej pozycji jest liczbowo mniejsza od połowy liczby pozycji mikrofonu. Jeśli nie jest to spełnione z zastosowaniem układu 20 mikrofonów, należy wyznaczyć dodatkowy układ 20 pozycji mikrofonu otrzymując go przez obrót źródła o  $180^\circ$  wokół osi z, albo przez podobny obrót układu pierwotnego. Czterdzieści pozycji mikrofonu obu układów odpowiada równym polom na kulistej lub półkulistej powierzchni pomiarowej.



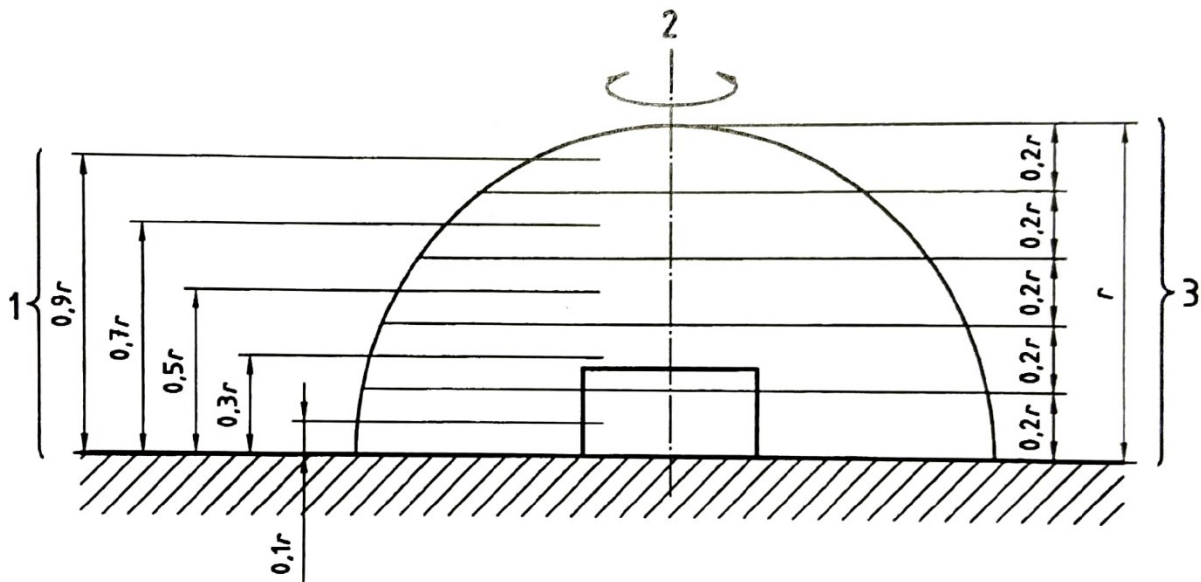
Rys. 4. Stałe pozycje mikrofonu na powierzchni półkuli [4]  
1-20 – pozycje mikrofonu

Gdy wymagane wystarczającej liczby pozycji mikrofonu nie jest spełnione z użyciem 40 pozycji, należy szczegółowo sprawdzić poziom ciśnienia akustycznego występującego na ograniczonym obszarze kulistej lub półkulistej, na którym może występować znaczna nierównomierność promieniowania bardzo kierunkowego źródła. Sprawdzenie to jest wymagane do wyznaczenia najwyższych i najniższych poziomów ciśnienia akustycznego w rozważanym zakresie częstotliwości. Po wdrożeniu tej procedury pozycje mikrofonów nie będą odpowiadać równym polom powierzchni kulistej lub półkulistej powierzchni pomiarowej, należy odpowiednio wybrać ich położenie i przy wyliczaniu powierzchniowego poziomu ciśnienia akustycznego skorzystać ze wzoru dla nierównych pól.

- Pojedynczy mikrofon przemieszczany jest wzdłuż kilku torów koncentrycznych równomiernie rozłożonych na kuli lub półkuli pomiarowej. Istnieje również możliwość utrzymywania mikrofonu w stałej pozycji i obracanie źródła dźwięku o  $360^\circ$  lub wielokrotności.

Poziom ciśnienia akustycznego jest uśredniany w przestrzeni i w czasie przez przemieszczanie pojedynczego mikrofonu kolejno wzdłuż kilku torów kołowych. W przypadku komory semibezechowej minimalna liczba przemieszczania wynosi 5, tak jak pokazano na rysunku 5. W szczególnych przypadkach źródeł promieniujących dźwięki tonalne o określonej częstotliwości, należy stosować co najmniej 20 torów pomiarowych. Dla komory bezechowej liczby torów wynoszą kolejno 10 i 40. Ponadto wysokość torów jest symetryczna w górnej i dolnej półkuli kulistej powierzchni pomiarowej.

W przypadku, kiedy okrężne tory uzyskuje się poprzez obracanie badanego źródła należy zadbać, aby powierzchnia stolika obrotowego, na którym posadowione jest źródło dźwięku nie była umieszczona wyżej od powierzchni płaszczyzny odbijającej niż 10% wysokości mierzonego źródła, a najlepiej była z nią zrównana.



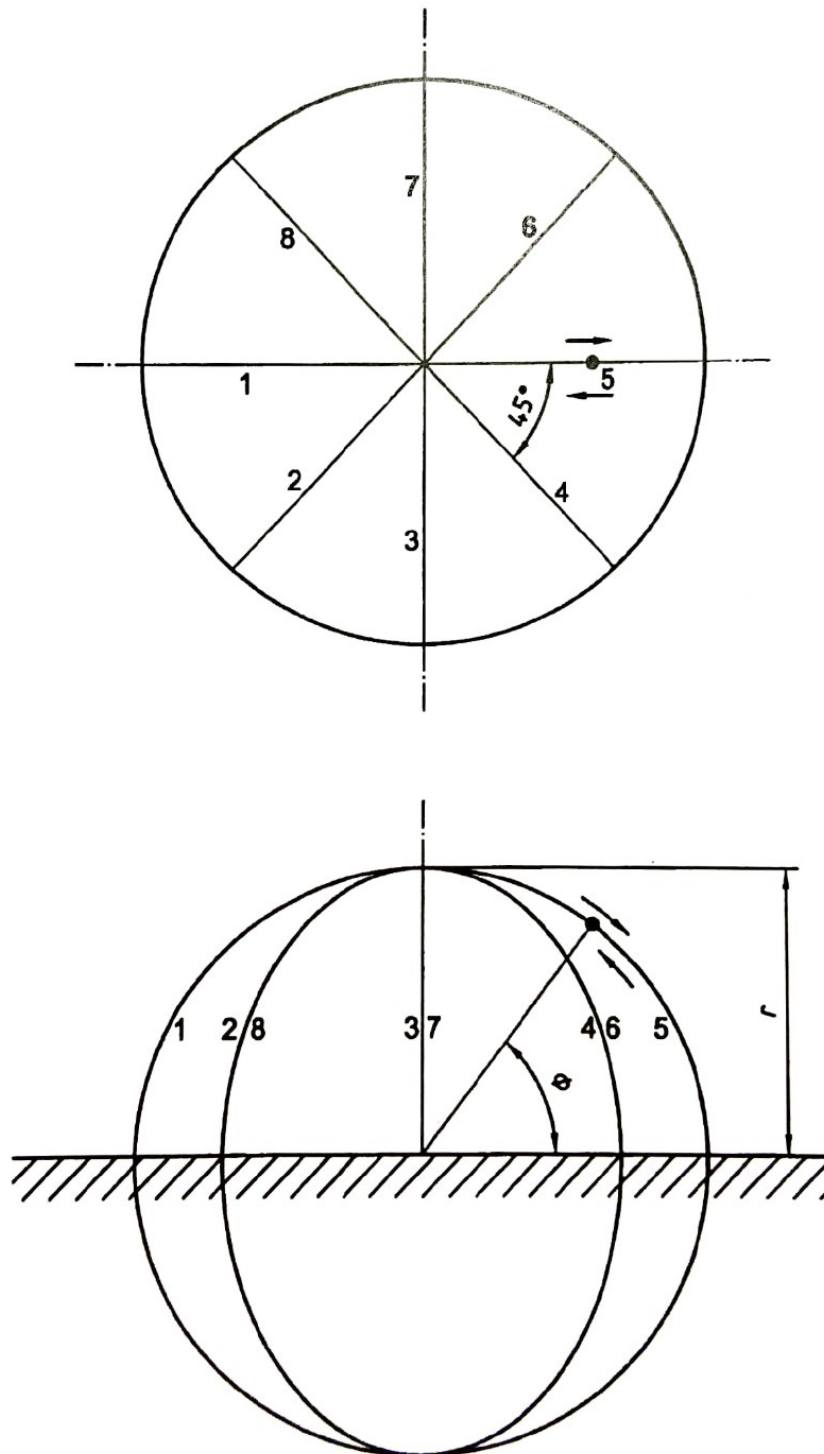
Rys. 5. Współśrodkowe kołowe tory przemieszczania mikrofonu [4]

1 – wyniesienie torów przemieszczania mikrofonu; 2 – oś obrotu mechanizmu przemieszczania mikrofonu; 3 – wysokości odpowiednich pól powierzchni półkuli

- Pojedynczy mikrofon przemieszczany jest wzdłuż kilku torów południkowych równomiernie rozłożonych na kuli lub półkuli pomiarowej.

Metoda ta polega na użyciu pojedynczego mikrofonu i przemieszczaniu go na drodze połowy okręgu o osi położonej poziomo i przechodzącej przez środek źródła jak na rysunku 6. Należy utrzymywać stałą prędkość pionową przemieszczania ( $dz/dt$ ). To oznacza, że prędkość kątowna napędu mikrofonu zwiększana jest proporcjonalnie do  $1/\cos\varphi$ , gdzie  $\varphi$  jest kątem ponad poziom. Sygnał wyjściowy mikrofonu jest podnoszony do kwadratu i uśredniany w układzie elektronicznym, z uwzględnieniem odpowiedniego ważenia pola powierzchni kuli lub półkuli. Alternatywą jest stosowanie stałej prędkości kątowej, ale z elektronicznym ważeniem o charakterystyce zgodnej z  $\cos\varphi$ . Należy stosować minimum 8 torów przemieszczania mikrofonu położonych w równych odstępach kątowych w płaszczyźnie poziomej źródła. Efekt ten można uzyskać poprzez obracanie źródła.

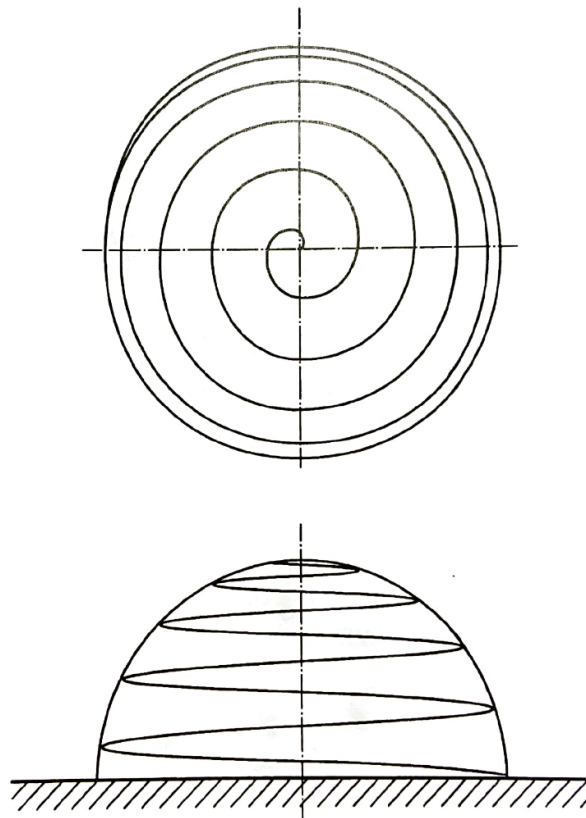




Rys. 6. Południkowe tory przemieszczania mikrofonu [4]  
1-8 – tory przemieszczania mikrofonu

- Pojedynczy mikrofon przemieszczany jest wzdłuż toru spiralnego wokół osi pionowej kuli lub półkuli pomiarowej.

Polega to na użyciu jednego południkowego toru przemieszczania zgodnie z punktem wyżej, przy równoczesnym powolnym przemieszczaniu mikrofonu wzdłuż całkowitej liczby, co najmniej 5 torów kołowych. Tworzy to drogę spiralną wokół pionowej osi powierzchni pomiarowej (rys. 7). Tor spiralny można również uzyskać przez powolne obracanie źródła ze stałą prędkością kątową przez przynajmniej 5 pełnych obrotów w czasie przemieszczania mikrofonu wzdłuż toru południkowego. Ważenie zależne od kąta opisano w punkcie wyżej.



Rys. 7. Spiralny tor przemieszczania mikrofonu [4]

Opisane wyżej metody ustawienia mikrofonu podczas pomiarów nie wykluczają innych pozycji mikrofonu i rodzajów powierzchni pomiarowej, które mogłyby pozwolić na uzyskanie większej dokładności. Jednak, żeby zastosować inne układy pozycji mikrofonu i inne powierzchnie pomiarowe, należy pokazać, że różnica poziomu mocy akustycznej w żadnym z pasm 1/3-oktawowych w zakresie częstotliwości pomiarowych nie przekracza 0,5dB w stosunku do poziomu występującego z zastosowaniem jednego z układów, które wymieniono wyżej. Zastosowana powierzchnia pomiarowa powinna całkowicie otaczać źródło. Powodem użycia innego układu mikrofonów niż zostały opisane powyżej powinno być dążenie do maksymalizacji dokładności pomiaru, a nie zmniejszenia liczby pozycji mikrofonu lub ograniczenia któregoś z układów.

### Wymagane dane

Poziom ciśnienia akustycznego powinien być mierzony w przedziale czasu typowym dla pracy mierzonego źródła. W każdej pozycji mikrofonu pomiary poziomu ciśnienia akustycznego powinny być przeprowadzone z zastosowaniem charakterystyki częstotliwościowej A i/lub w każdym paśmie częstotliwości pomiarowych.

Czas pomiaru powinien wynosić minimum 30s dla pasm o częstotliwości środkowej 160Hz i poniżej. Czas pomiaru powinien wynosić minimum 10s przy pomiarze poziomów ciśnienia akustycznego skorygowanych charakterystyką częstotliwościową A oraz poziomów w pasmach o częstotliwości środkowej 200Hz i powyżej.

Dodatkowo należy zmierzyć warunki meteorologiczne występujące w czasie pomiarów (ciśnienie atmosferyczne, temperatura, wilgotność powietrza w pobliżu źródła).

### Poprawka uwzględniająca tło

Przed przystąpieniem do wyznaczania powierzchniowego poziomu ciśnienia akustycznego należy wyznaczyć poprawkę uwzględniającą poziom ciśnienia akustycznego tła. Jeżeli poziom hałasu tła  $L''_{pi}$  w każdej pozycji mikrofonu lub w czasie każdego przemieszczenia mikrofonu,

w każdym paśmie pomiarowym, są 10-20dB niższe od poziomów ciśnienia akustycznego  $L'_{pi}$  mierzonych w czasie pracy źródła, należy skorygować wartości poziomów  $L'_{pi}$  ze względu na wpływ hałasu tła. Od zmierzonych poziomów ciśnienia akustycznego należy odjąć poprawkę  $K_{1i}$ , która jest obliczana dla każdego pasma częstotliwości i pozycji mikrofonu zgodnie ze wzorem:

$$K_{1i} = -10 \lg(1 - 10^{-0,1\Delta L_i}) \text{dB}$$

gdzie:

$$\Delta L_i = L'_{pi} - L''_{pi}$$

co daje:

$$L_{pi} = L'_{pi} - K_{1i}$$

Jeżeli poziomy tła są niższe o ponad 20dB to nie stosuje się poprawki.

W przypadku źródeł dźwięku wytwarzających niskie poziomy ciśnienia akustycznego, poziom hałasu tła może być mniejszy niż 10dB poniżej tych poziomów w kilku pasmach w badanym zakresie częstotliwości. Największa poprawka stosowana w takim przypadku powinna wynosić 0,5dB w tych pasmach.

Jeśli trzeba wyznaczyć poziom mocy akustycznej skorygowany charakterystyką częstotliwościową A, całkowity poziom należy obliczyć na dwa sposoby:

- stosując wyniki uzyskane w każdym paśmie w rozważanym zakresie częstotliwości;
- nie uwzględniając tych pasm częstotliwości, w których poziom hałasu tła jest mniejszy niż 10dB poniżej poziomu ciśnienia akustycznego w czasie pracy źródła.

Jeśli różnica między tymi poziomami jest mniejsza niż 0,5dB to całkowity poziom powinien być obliczony z uwzględnieniem wyników we wszystkich pasmach. Natomiast jeśli jest różnica jest większa niż 0,5dB to całkowity poziom obliczony z uwzględnieniem wyników we wszystkich pasmach odpowiada górnej wartości poziomu mocy akustycznej, co powinno być jednoznacznie uwzględnione w sprawozdaniu z badań.

### Obliczenia powierzchniowego poziomu ciśnienia akustycznego

Poziom mocy akustycznej źródła  $L_W$  obliczany jest z powierzchniowego poziomu ciśnienia akustycznego  $\overline{L_{pf}}$  uśrednionego na powierzchni kuli (lub półkuli). Powierzchniowy poziom ciśnienia akustycznego  $\overline{L_{pf}}$  obliczany jest na podstawie przestrzennego uśredniania kwadratu ciśnienia akustycznego na kulistej (lub półkulistej) powierzchni pomiarowej.

Gdy pozycje mikrofonów są stałe i odnoszą się do powierzchni cząstkowych o równych polach na kulistej (lub półkulistej) powierzchni pomiarowej to do otrzymania powierzchniowego poziomu ciśnienia akustycznego  $\overline{L_{pf}}$  stosuje się wzór:

$$\overline{L_{pf}} = 10 \lg \left( \frac{1}{N} [\sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}}] \right) \text{dB}$$

gdzie:

$L_{pi}$  – poziom ciśnienia akustycznego z poprawką uwzględniającą hałas tła w  $i$ -tej pozycji mikrofonu (w odniesieniu do  $\mu\text{Pa}$ ) [dB];

$N$  – liczba pozycji mikrofonu.

Gdy pozycje mikrofonów są stałe i odnoszą się do powierzchni cząstkowych o nierównych polach na kulistej (lub półkulistej) powierzchni pomiarowej to do otrzymania powierzchniowego poziomu ciśnienia akustycznego  $\overline{L_{pf}}$  stosuje się wzór:

$$\overline{L_{pf}} = 10 \lg \left( \frac{1}{S} [\sum_{i=1}^N S_i \times 10^{0,1L_{pi}}] \right) \text{dB}$$

gdzie:

$L_{pi}$  – poziom ciśnienia akustycznego z poprawką uwzględniającą hałas tła w  $i$ -tej pozycji mikrofonu (w odniesieniu do  $\mu\text{Pa}$ ) [dB];

$S_i$  – pole powierzchni cząstkowej kuli (lub półkuli) odpowiadające  $i$ -tej pozycji mikrofonu;

$S$  – całkowite pole kulistej (lub półkulistej) powierzchni pomiarowej;

$N$  – liczba pozycji mikrofonu.

Gdy mikrofon przemieszczany jest wzdłuż toru kołowego, powierzchniowy poziom ciśnienia akustycznego  $\overline{L_{pf}}$  otrzymywany jest ze wzoru:

$$\overline{L_{pf}} = 10 \lg \left( \frac{1}{N} [\sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}}] \right) \text{dB}$$

gdzie:

$L_{pi}$  – średni poziom ciśnienia akustycznego z poprawką uwzględniającą hałas tła dla  $i$ -tego toru przemieszczania mikrofonu (w odniesieniu do  $\mu\text{Pa}$ ) [dB];

$N$  – liczba pozycji mikrofonu.

Dla pomiarów przy pomocy południkowych torów łukowych lub torów spiralnych powierzchniowy poziom ciśnienia akustycznego  $\overline{L_{pf}}$  otrzymuje się poprzez podniesienie do kwadratu i uśrednienie sygnału wyjściowego mikrofonu z zastosowaniem odpowiedniego ważenia pola powierzchni kuli.

## Obliczenia poziomu mocy akustycznej [4]

### Komora bezechowa

Poziom mocy akustycznej  $L_W$  źródła w polu swobodnym, w meteorologicznych warunkach odniesienia  $23^\circ\text{C}$  i  $101325\text{Pa}$ , obliczany jest ze wzoru:

$$L_W = \overline{L_{pf}} + 10 \lg \left( \frac{S_1}{S_0} \right) \text{dB} + C_1 + C_2,$$

gdzie:

$$C_1 = -10 \lg \left[ \frac{B}{B_0} \sqrt{\frac{313,15}{273,15+\theta}} \right] \text{dB};$$

$$C_2 = -15 \lg \left[ \frac{B}{B_0} \sqrt{\frac{296,15}{273,15+\theta}} \right] \text{dB},$$

Wzór stosowany w zakresie temperatur  $15^\circ\text{C} \leq \theta \leq 30^\circ\text{C}$

gdzie:

$S_1 = 4\pi r^2$  – pole kulistej powierzchni pomiarowej (o promieniu  $r$ );

$S_0 = 1\text{m}^2$ ;

$B$  – ciśnienie atmosferyczne występujące w czasie pomiarów [Pa];

$B_0 = 101325\text{Pa}$  – ciśnienie atmosferyczne odniesienia;

$\theta$  – temperatura powietrza podczas pomiarów [ $^\circ\text{C}$ ].

### Komora semibezehowa

Poziom mocy akustycznej  $L_W$  źródła w polu swobodnym nad płaszczyzną odbijającą oblicza się ze wzoru:

$$L_W = \overline{L_{pf}} + 10 \lg \left( \frac{S_2}{S_0} \right) \text{dB} + C_1 + C_2,$$

gdzie:

$S_2 = 2\pi r^2$  – pole półkulistej powierzchni pomiarowej (o promieniu  $r$ );

pozostałe symbole – jak wyżej.

## Skorygowany poziom mocy akustycznej

Wartości powierzchniowego poziomu ciśnienia akustycznego  $\overline{L_{pf}}$  mogą być otrzymane z wykorzystaniem układów ważenia systemu pomiarowego (np. charakterystyki częstotliwościowej A) lub z zastosowaniem pasmowego filtra 1/3-oktawowego. Jeśli celem jest otrzymanie skorygowanego poziomu mocy akustycznej, obliczenia z zastosowaniem powyższych wzorów wykonuje się jednorazowo. Aby otrzymać poziom mocy akustycznej w pasmach częstotliwości, procedura obliczeniowa powinna zostać powtórzona dla każdego pasma częstotliwości. Poziom mocy akustycznej skorygowany charakterystyką częstotliwościową A może także zostać otrzymany na podstawie poziomów mocy akustycznej w pasmach częstotliwości. Stosuje się do tego wzór:

$$L_{WA} = 10 \lg \sum_{j=j_{min}}^{j_{max}} 10^{(L_{Wj}+C_j)/10} \text{ dB}$$

gdzie:

$L_{Wj}$  – poziom mocy akustycznej w  $j$ -tym paśmie 1/3-oktawowym [dB];

$j, C_j$  – podano w tabeli 1;

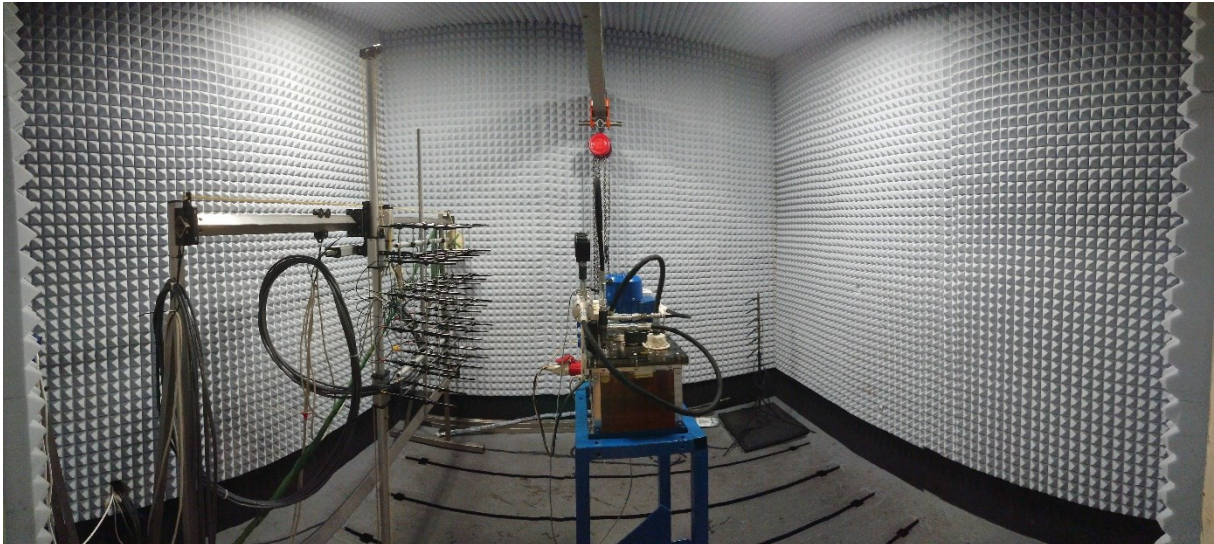
$j_{min}, j_{max}$  – wartości  $j$  odpowiadające pasmom podanym w tabeli 1 o najmniejszej i największej częstotliwości środkowej.

Tabela 1. Wartości  $j$  i  $C_j$  dla pasm 1/3-oktawowych [4]

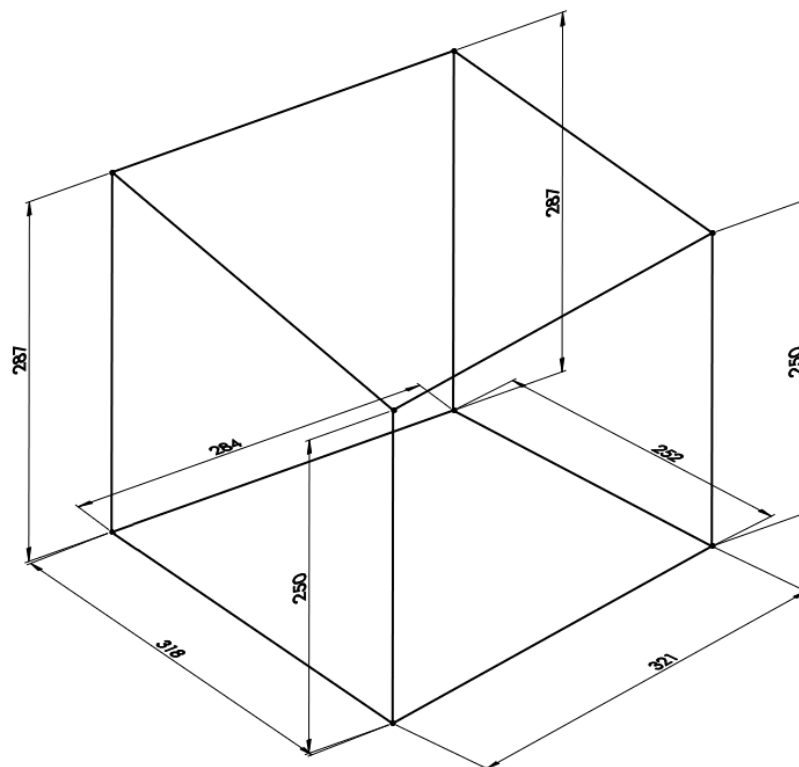
$j$	Częstotliwość środkowa pasma 1/3-oktawowego [Hz]	$C_j$ [dB]
1	50	-30,2
2	63	-26,2
3	80	-22,5
4	100	-19,1
5	125	-16,1
6	160	-13,4
7	200	-10,9
8	250	-8,6
9	315	-6,6
10	400	-4,8
11	500	-3,2
12	630	-1,9
13	800	-0,8
14	1000	0
15	1250	+0,6
16	1600	+1,0
17	2000	+1,2
18	2500	+1,3
19	3150	+1,2
20	4000	+1,0
21	5000	+0,5
22	6300	-0,1
23	8000	-1,1
24	10000	-2,5
25	12500	-4,3
26	16000	-6,6
27	20000	-9,3

## Ćwiczenie laboratoryjne

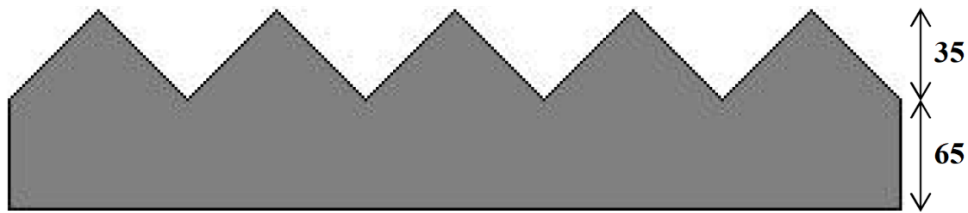
Pomiary poziomu ciśnienia akustycznego dźwięku generowanego przez źródło będą przeprowadzone w komorze semibezachowej Zakładu Napędów i Automatyki Hydraulicznej Politechniki Wrocławskiej (rys. 8). Komora ta nie spełnia wymogów normatywnych, dlatego może być używana tylko w badaniach porównawczych oraz przy lokalizacji źródeł dźwięku. Jej objętość to ok.  $23 \text{ m}^3$ , a wymiary są podane na rysunku 9. Ściany o grubości 45cm wyłożone są dźwiękochłonnym materiałem z pianki z żywicy melaminowej Noiseflex® MH. Klipy mają kształt ostrosłupów o podstawie kwadratu i wymiary podane na rysunku 10. Zastosowana pianka charakteryzuje się wysoką absorpcją dźwięku, co zostało pokazane na rysunku 11.



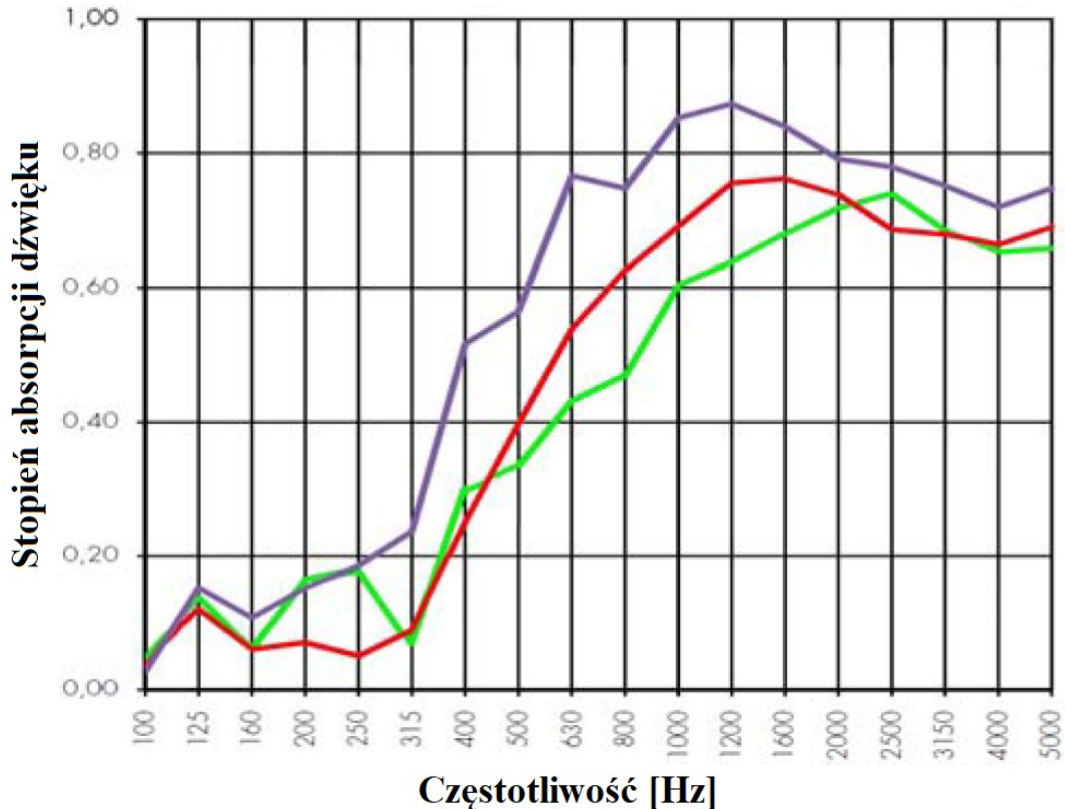
Rys. 8. Komora semibezachowa w laboratorium Zakładu Napędów i Automatyki Hydraulicznej Politechniki Wrocławskiej



Rys. 9. Wymiary komory semibezachowej w laboratorium Zakładu Napędów i Automatyki Hydraulicznej Politechniki Wrocławskiej



Rys. 10. Wymiary materiału dźwiękochłonnego zastosowanego w komorze semibezzechowej Zakładu Napędów i Automatyki Hydraulicznej Politechniki Wrocławskiej [6]



Rys. 11. Współczynnik absorpcji dźwięku w zależności od częstotliwości dla różnych grubości pianki z żywicy melaminowej Noiseflex® MH [6]:  
zielona linia – 30mm, czerwona linia – 50mm, fioletowa linia – 70mm.

Studenci mają za zadanie wyznaczyć skorygowany poziom mocy akustycznej zgodnie z tokiem obliczeń podanym powyżej. Obiektem badań będzie urządzenie lub maszyna wskazana przez prowadzącego zajęcia. Ponadto będzie on czuwał nad poprawnym przeprowadzeniem badań akustycznych w komorze semibezzechowej.

## Literatura

- [1] Dobrucki A., Szmal C.: *Raport z badania pogłosowej komory akustycznej w I-16.*
- [2] <https://steemit.com/sound/@playitforward/anechoic-chamber-the-quietest-places-on-earth>
- [3] <http://acustica.snu.ac.kr/facilities/Semi-Anechoic-Chamber>
- [4] EN ISO 3745:2003+AC:2006
- [5] Rusz R.: *Design of a Fully Anechoic Chamber, TRITA-AVE, 2015.*
- [6] Karta katalogowa Noiseflex® Pyramis MH firmy Bosig.