

**Politechnika Gdańska**  
**Wydział Architektury**  
**Katedra Techniki Budownictwa**

Pracownia Akustyki Architektonicznej i Ochrony Przeciwdzwiękowej

**ĆWICZENIA PROJEKTOWE**  
**Z AKUSTYKI POMIESZCZEŃ**  
**Z WYKORZYSTANIEM**  
**PROGRAMU KOMPUTEROWEGO**  
**"SABINE"**

Gdańsk 2006

*Niniejsze opracowanie obejmuje zestaw sześciu ćwiczeń dotyczących zastosowania statystycznej metody analizy akustycznego do badania i akustycznego projektowania pomieszczeń. Ćwiczenia są wspomagane komputerowo lub w całości realizowane przy użyciu komputera. Opracowanie wraz z ćwiczeniami jest uzupełnieniem wykładu "Akustyczne projektowanie pomieszczeń", znajdującego się w programie studiów na Wydziale Architektury Politechniki Gdańskiej.*

*W ćwiczeniach wykorzystano program komputerowy "SABINE". Nazwa programu pochodzi od nazwiska amerykańskiego akustyka Wallace'a Clementa Sabine'a (1868-1919), twórcy statystycznej teorii pola akustycznego w pomieszczeniach.*

*Opracował: dr hab. inż. Andrzej Kulowski*

## SPIS TREŚCI

1. Część teoretyczna
  - 1.1. Wprowadzenie
  - 1.2. Statystyczna metoda analizy pola akustycznego w pomieszczeniach
  - 1.3. Chłonność akustyczna materiałów wykończeniowych i elementów wyposażenia pomieszczeń
  - 1.4. Obliczeniowa ocena poziomu dźwięku
  - 1.5. Odległość graniczna
  - 1.6. Jakość akustyczna sal
2. Opis programu
  - 2.1. Menu programu
  - 2.2. Wzory obliczeniowe
  - 2.3. Baza danych
3. Ćwiczenia
  - 3.1. Zapoznanie się z obsługą programu
  - 3.2. Przegląd dźwiękochłonnych właściwości materiałów budowlanych
  - 3.3. Oszacowanie wpływu pochłaniania dźwięku przez powietrze na czas pogłosu pomieszczenia
  - 3.4. Projekt akustycznego wystroju pomieszczenia
  - 3.5. Ocena jakości akustycznej pomieszczenia
  - 3.6. Obliczanie wpływu wytłumienia pomieszczenia na poziom dźwięku w polu pogłosowym
4. Literatura.

# 1. CZĘŚĆ TEORETYCZNA

## 1.1. WPROWADZENIE

Pole akustyczne jest przestrzennym układem nakładających się na siebie fal akustycznych. Właściwości akustyczne pomieszczeń wynikają z takich cech pola jak układ kierunków biegu fal, intensywność efektu nakładania się fal, tj. ich wzmacnianie się lub wygaszanie, prędkość narastania lub zanikania energii i in. Przewidywanie właściwości akustycznych pomieszczeń podczas ich projektowania wymaga określenia ww. cech pola dla danego kształtu pomieszczenia i układu materiałów odbijających i pochłaniających dźwięk. Do tego celu służą trzy metody analizy pola akustycznego w pomieszczeniach: falowa, geometryczna i statystyczna. Każda z nich pozwala badać inny zespół cech pola, zaś zastosowane łącznie pozwalają przewidzieć właściwości akustyczne pomieszczenia z dokładnością wystarczającą dla celów projektowych.

Metoda geometryczna polega na określeniu kierunków biegu fal w oparciu o prawo odbicia<sup>1</sup>, a po uwzględnieniu prędkości dźwięku w powietrzu również czasu dojścia fali odbitej do poszczególnych punktów pomieszczenia. Metoda ta, odnosząca się do wszystkich rodzajów fal, tj. akustycznych, świetlnych, elektromagnetycznych i in., jest najbardziej znana z jej zastosowań w optyce. Wykreślona postać metody geometrycznej jest zwykle ograniczona do 1-2 odbić analizowanych na płaszczyźnie, np. na rzutach i przekrojach pomieszczenia. Zastąpienie postępowania wykreślnego programem komputerowym umożliwia badanie rozchodzenia się fal w przestrzeni trójwymiarowej oraz uwzględnienie znacznie większej liczby odbić<sup>2</sup>. Metoda geometryczna, której podstawowe elementy były wykorzystywane już w starożytności przez twórców amfiteatrów antycznych, jest również w użyciu współcześnie, stanowiąc podstawę większości specjalistycznych programów komputerowych do akustycznego projektowania sal.

Metoda falowa polega na rozwiązaniu równania różniczkowego (tzw. równanie falowe), którego warunki brzegowe opisują kształt pomieszczenia i układ materiałów odbijających i pochłaniających dźwięk. Rozwiązanie tego równania pozwala na określenie częstotliwości drgań własnych ciała sprężystego, jakie stanowi powietrze ograniczone ścianami pomieszczenia, oraz przestrzennego układu węzłów i strzałek fal stojących o tych częstotliwościach. Równanie to jest zwykle rozwiązywane metodami komputerowymi.

Wcześniej omówione metody zakładają, że pole akustyczne jest obiektem przestrzennym o stałych rozłożonych, tj. takim, którego cechy zależą od punktu obserwacji. Metoda statystyczna opiera się natomiast na założeniu, że pole akustyczne jest izotropowe, tj. właściwości akustyczne pomieszczenia są jednakowe w każdym jego punkcie. W świetle metody statystycznej pomieszczenie jest zatem obiektem o stałych skupionych. Ujęcie to jest dalece uproszczone, pozwala jednak na szybkie oszacowanie właściwości akustycznych pomieszczenia. Dzięki temu metoda statystyczna jest powszechnie stosowana przez architektów i projektantów wnętrz. Metoda statystyczna jest podstawą ćwiczeń projektowych będących treścią opracowania i jest szerzej omówiona niżej.

## 1.2. STATYSTYCZNA METODA ANALIZY POLA AKUSTYCZNEGO W POMIESZCZENIACH

Metoda statystyczna została opracowana przez amerykańskiego akustyka Wallace'a Clementa Sabine'a ok. 1895 r. Podstawowym jej celem jest obliczenie czasu pogłosu pomieszczenia. Wg definicji podanej przez Sabine'a jest to czas, po upływie którego moc pola po wyłączeniu stacjonarnego źródła dźwięku zmniejsza się milion razy (w mierze logarytmicznej o 60 dB). Metoda statystyczna pozwala również obliczyć moc pola w pomieszczeniu przed wyłączeniem źródła, promień graniczny i średnią drogę swobodną.

U podstaw metody statystycznej leży założenie, że w pomieszczeniu istnieje izotropowe, stacjonarne pole akustyczne. Oznacza to, że do każdego punktu pomieszczenia docierają fale o fazach przypadkowych i mocach równomiernie rozłożonych w pełnym kącie bryłowym wokół tego punktu, oraz że dźwięk istniejący w pomieszczeniu nie ulega zmianom w czasie. W tym stanie określana jest moc pola, promień graniczny i

<sup>1</sup> Zgodnie z prawem odbicia, kąt padania fali jest równy kątowi odbicia, zaś proste wyznaczające kierunki fali padającej i odbitej oraz normalna do powierzchni odbijającej leżą w jednej płaszczyźnie.

<sup>2</sup> W sali wykładowej średniej wielkości liczba odbić wynosi zwykle 30-50.

średnia droga swobodna. Po wyłączeniu źródła następuje zjawisko zanikania dźwięku, pozwalającego określić czas pogłosu.

Wobec izotropowości pola, moc pola w stanie stacjonarnym i czas pogłosu są jednakowe we wszystkich punktach pomieszczenia i nie zależą od położenia źródła dźwięku. Jest to sytuacja wyidealizowana, tj. nie występująca w warunkach rzeczywistych. Przyjęcie takiego założenia pozwala jednak na wyprowadzenie prostych wzorów obliczeniowych, przydatnych do celów projektowych.

Przykładem pola izotropowego spoza dziedziny akustyki jest pole świetlne na otwartej przestrzeni w dzień pochmurny, w zamglonym powietrzu. Światło dochodzące z każdego kierunku ma wówczas taką samą intensywność, skutkiem czego tworzące się cienie są mocno rozmyte. Pole świetlne powstające w dzień słoneczny jest natomiast polem nieizotropowym. Światło dochodzące od strony słońca ma wówczas większą intensywność niż światło dochodzące z innych kierunków, skutkiem czego powstają cienie o wyraźnych granicach.

W przypadku pola akustycznego, izotropowe pole akustyczne można z dobrym przybliżeniem wytworzyć w tzw. komorach pogłosowych, tj. pomieszczeniach przeznaczonych do pomiarów właściwości akustycznych materiałów używanych m.in. w akustyce pomieszczeń. Dla zapewnienia izotropowości pola długość, szerokość i wysokość prostopadłościanu zawierającego opisywane pomieszczenie są do siebie zbliżone, zaś wszystkie ściany pokrywa materiał silnie odbijający dźwięk (zwykle szlichta cementowa).

Z gorszym przybliżeniem założenia metody statystycznej są spełnione w pomieszczeniach, których ściany pochłaniają dźwięk w niejednakowym stopniu. Dotyczy to większości pomieszczeń spotykanych na co dzień, w szczególności sal użytku publicznego (sale koncertowe, audytoria, kina itp.). Wobec silnego pochłaniania dźwięku przez widownię a jednocześnie znikomego pochłaniania przez ściany i sufit, w salach tych izotropowość pola jest mniejsza niż w komorach pogłosowych. Ponieważ izotropowość pola, potocznie rozumiana jako silne rozproszenie dźwięku, jest korzystna dla akustyki sal, często stosuje się łamanie i profilowanie ścian oraz sufitu. Rozproszeniu dźwięku sprzyja także obecność w sali kolumn, balkonów, kasetonów sufitowych itp. Izotropowość pola jest wówczas na tyle duża, że wzory oparte na metodzie statystycznej mogą być stosowane do projektowania akustycznego sal (patrz m.in. niżej podane wzory na czas pogłosu). Należy jednak mieć świadomość, że wobec nie spełnienia wszystkich założeń metody statystycznej wzory te dają wynik przybliżony.

Z racji zbyt dużego odstępstwa od wymogu izotropowości pola, metoda statystyczna nie dotyczy pomieszczeń o długości, szerokości i wysokości znacznie się różniących, np. długich i wąskich korytarzy, rozległych i niskich hal itp. Metoda nie dotyczy również przypadków, gdy fazy rozchodzących się fal są na tyle uporządkowane, że interferują one ze sobą. Ma to miejsce w przypadku, gdy długość fal jest tego samego rzędu, co wymiary pomieszczenia. Manifestuje się wówczas falowa natura pola akustycznego, analizowana przy użyciu metody falowej. Przejawem falowej natury pola są tzw. fale stojące, będące efektem interferencji fal. Pomieszczenie działa wówczas jak rezonator akustyczny. W rezultacie, wraz ze zmniejszaniem się częstotliwości dźwięku zjawisko opisywane metodą falową, tj. rezonans akustyczny, coraz bardziej dominuje energetycznie nad zjawiskiem opisywanym teorią statystyczną, tj. rozproszeniem pola. Częstotliwość  $f$  rozdzielającą zakresy występowania zjawisk statystycznych i falowych podał niemiecki akustyk M.F. Schroeder:

$$f = 4000\sqrt{T/V} \quad (1)$$

gdzie  $T$ : czas pogłosu [s],  $V$ : objętość pomieszczenia [ $m^3$ ].

### 1.3. CHŁONNOŚĆ AKUSTYCZNA MATERIAŁÓW WYKOŃCZENIOWYCH I ELEMENTÓW WYPOSAŻENIA POMIESZCZEŃ

Na akustykę pomieszczenia wpływa jego kształt i wielkość, a także chłonność akustyczna powierzchni wewnętrznych pomieszczenia i wszystkich znajdujących się w nim obiektów (elementy wyposażenia, meblowanie, osoby itp.). Pod pojęciem chłonności akustycznej rozumie się liczbowo wyrażoną zdolność pochłaniania dźwięku. Jednostką chłonności akustycznej jest "Sabine", w układzie jednostek SI wyrażany w  $m^2$ . 1 Sabine odpowiada całkowitemu pochłanianiu dźwięku na powierzchni  $1 m^2$ . Właściwość taką ma np. otwarte okno o powierzchni  $1 m^2$ , które całkowicie "pochłania" padające na nie dźwięki.

- Chłonność akustyczną obiektów znajdujących się w pomieszczeniu można określić na dwa sposoby:
- przez podanie chłonności danego obiektu, np. mebla, elementu wyposażenia, osoby itp.,
  - przez pomnożenie współczynnika pochłaniania dźwięku  $\alpha$  dotyczącego danego materiału przez pole powierzchni tego materiału

$$A = \alpha S \quad (2)$$

gdzie:  $\alpha = E_{\text{pochł}} / E_{\text{pad}}$  (3)  
 $E_{\text{pochł}}$ ,  $E_{\text{pad}}$ : energia fali pochłoniętej i energia fali padającej w jednostce czasu,  
 $S$ : pole powierzchni materiału,  $\text{m}^2$ .

Wartości  $A$  i  $\alpha$  dla poszczególnych obiektów i materiałów są publikowane w literaturze specjalistycznej. Są one określane przez pomiary akustyczne z wykorzystaniem próbki o polu powierzchni min.  $12 \text{ m}^2$ . Próbkę stanowi badany materiał, powierzchnia zastawiona elementami wyposażenia, fotelami teatralnymi z siedzącymi na nich osobami itp. Pomiary wykonuje się w komorze pogłosowej. Podczas pomiaru dźwięk odbity od ścian pada na próbkę ze wszystkich stron, co powoduje uśrednienie mierzonych wielkości dla wszystkich kątów padania dźwięku. Takie warunki pomiarowe są zgodne z założeniem metody statystycznej dotyczącym izotropowości pola akustycznego. Stąd również pochodzi nazwa współczynnika  $\alpha$  używanego w opisywanych niżej obliczeniach: pogłosowy współczynnik pochłaniania dźwięku<sup>3</sup>.

Zgodnie ze wzorem (2), współczynnik  $\alpha$  może przyjmować wartości  $0 \leq \alpha \leq 1$  ( $\alpha=0$  dla  $E_{\text{pochł}}=0$ , tj. przy całkowitym odbiciu fali;  $\alpha=1$  dla  $E_{\text{pochł}}=E_{\text{pad}}$ , tj. przy całkowitym pochłonięciu). Iloczyn  $\alpha \cdot 100\%$  można też interpretować jako wyrażony w procentach stopień pochłaniania dźwięku przez dany materiał. W warunkach całkowitego odbicia lub całkowitego pochłaniania fali, tj. przy  $\alpha=0$  lub  $\alpha=1$ , stopień ten wynosi odpowiednio 0% lub 100%.

Zarówno chłonność akustyczna obiektu  $A$  jak i współczynnik  $\alpha$  zależą od częstotliwości dźwięku. Chłonność akustyczną pomieszczenia wraz ze znajdującymi się w nim elementami wyposażenia, osobami itp. opisuje wzór:

$$A(f) = \sum_{k=1}^K \alpha_k(f) S_k + \sum_{j=1}^J A_j(f) \quad (4)$$

gdzie:  $\alpha_k(f)$ : współczynniki pochłaniania dźwięku poszczególnych powierzchni o polach  $S_k$ ,  
 $K$ : liczba powierzchni ograniczających pomieszczenie,  
 $A_j(f)$ : chłonność akustyczna pojedynczego obiektu,  
 $J$ : liczba obiektów w pomieszczeniu.

Pokrycie ścian pomieszczenia materiałem o coraz większym współczynniku  $\alpha$  powoduje, że rośnie energia fal pochłanianych przez ściany. W rezultacie maleje moc pola akustycznego w pomieszczeniu. Zjawisko to jest szczególnie efektywne w polu pogłosowym, tj. w takiej odległości od źródła, gdzie dominującym składnikiem pola są fale odbite. Jest to wykorzystywane np. w ochronie przeciwdźwiękowej hal przemysłowych, gdzie poprzez wytłumienie hali można zmniejszyć poziom dźwięku w hali. Obowiązuje tu następujący wzór:

$$\Delta L(f) = 10 \log (A_2(f)/A_1(f)) \quad (5)$$

gdzie  $\Delta L(f)$ : zmniejszenie poziomu dźwięku w polu pogłosowym w funkcji częstotliwości,  
 $A_1(f)$ ,  $A_2(f)$ : chłonność akust. pomieszczenia w funkcji częstotliwości przed i po wytłumieniu,  $[\text{m}^2]$ ,

<sup>3</sup> Właściwości dźwiękochłonne materiałów można również przedstawić przy użyciu tzw. fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku. Zależy on od kąta padania fali i jest mierzony przy użyciu rury Kundta. Fizyczny współczynnik nie jest wykorzystywany w metodzie statystycznej.

Należy zwrócić uwagę, że chłonność akustyczna dotyczy zjawiska tłumienia powierzchniowego, tj. odnosi się do pochłaniania dźwięku przez powierzchnię ograniczającą pole akustyczne. Nie pochłonięta energia powraca do pomieszczenia, niesiona przez falę odbitą. Inną formą tłumienia jest tłumienie transmisyjne, odnoszące się do przenikania dźwięku przez przegrodę. Nie pochłonięta energia przenika przez przegrodę, nie powracając do pomieszczenia. Metoda statystyczna dotyczy tłumienia powierzchniowego.

#### 1.4. LICZBOWA OCENA POZIOMU DŹWIĘKU

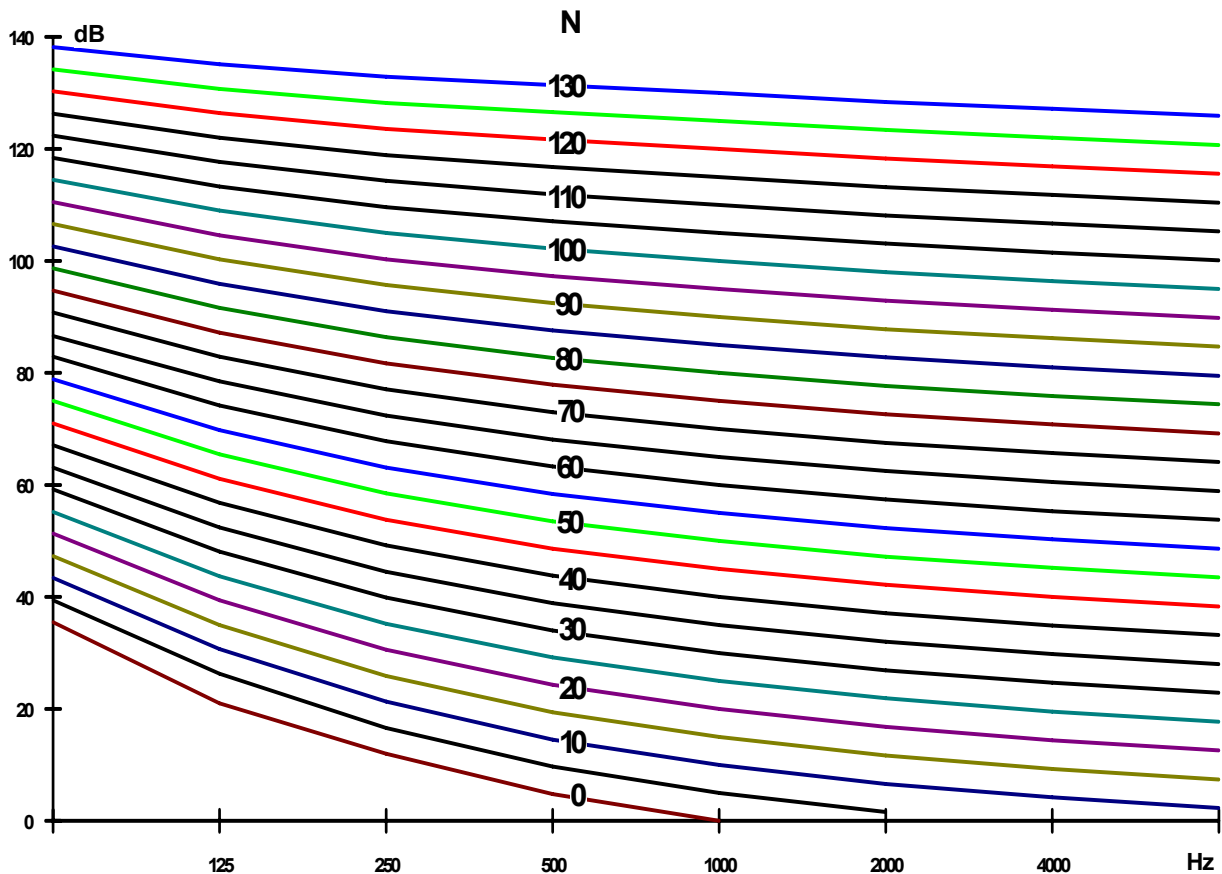
Poziom dźwięku w stanie stacjonarnym można wyrazić jako funkcję częstotliwości lub w postaci jednej liczby, jako łączną moc pola w całym paśmie. W drugim z tych przypadków poziom może być wyrażony z uwzględnieniem specyfiki ucha ludzkiego, polegającej na naturalnym upośledzeniu słyszenia niskich częstotliwości. W tym celu wykorzystuje się tzw. krzywe wagowe, określające zależność subiektywnie odczuwanej głośności dźwięku od częstotliwości.

Jedną z krzywych wagowych jest krzywa A, na podstawie której wyznaczany jest poziom dźwięku A (ozn.  $L(A)$ ). Odpowiada on głośności dźwięku odczuwanej przez człowieka. Różnica między poziomem dźwięku  $L(A)$  i poziomem  $L_{lin}$ , gdzie nie uwzględnia się korekcji barwy wynikającą z krzywej A, zależy od widma dźwięku i dla niskich dźwięków może sięgać kilkunastu dB (patrz Tab. 1). Gdy charakterystyka częstotliwościowa poziomu jest przedstawiona jako wartości poziomu w kolejnych pasmach oktaowych,  $L_{lin}$  oraz  $L(A)$  oblicza się następująco:

$$L_{lin} = 10 \log \sum_{i=1}^9 10^{\frac{L_i}{10}} \quad [\text{dB}], \quad L(A) = 10 \log \sum_{i=1}^9 10^{\frac{L_i+k_i}{10}} \quad [\text{dB(A)}] \quad (6), (7)$$

gdzie  $L_i$ : wartość poziomu dźwięku w  $i$ -tym paśmie oktaowym, [dB]

$k_i$ : współczynnik krzywej wagowej A w  $i$ -tym paśmie częstotliwości, [dB], patrz Tabl. 1.



Rys. 1. Krzywe oceny hałasu N

**Tablica 1. Współczynniki krzywej wagowej A**

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f [Hz]	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
k <sub>i</sub> [dB]	-39	-26	-16	-9	-3	0	+1	+1	+1

Zdarza się jednak, że dwa dźwięki mają ten sam poziom A, lecz różnią się stopniem uciążliwości wskutek dużych różnic w kształcie charakterystyki częstotliwościowej (np. moc pierwszego dźwięku jest skupiona w dolnej części pasma, zaś moc drugiego - w górnej, co można zilustrować dudnieniem wywołanym przejazdem pociągu i piskiem hamulców samochodowych). Uwzględnienie tego czynnika umożliwiającą tzw. krzywe oceny hałasu N (rys. 1).

### 1.5. ODLEGŁOŚĆ GRANICZNA

Pole akustyczne w pomieszczeniu tworzą fale biegnące bezpośrednio ze źródła i fale odbite od ścian. Odległość  $r$ , w której moc fali bezpośredniej równa jest mocy fal odbitych, nosi nazwę odległości granicznej. Dla punktowego izotropowego źródła dźwięku działającego w rozproszonym polu akustycznym odległość ta wynosi

$$r = 0.057\sqrt{V/T} \quad (8)$$

i jest jednakowa we wszystkich kierunkach patrząc ze źródła. W związku z zależnością  $T$  od częstotliwości,  $r$  również jest funkcją częstotliwości.

Dla źródeł kierunkowych odległość graniczna zmienia się wraz z kątem względem głównej osi promieniowania źródła. Źródła kierunkowe stanowią większość źródeł spotykanych w praktyce, są nimi m.in. głośniki, instrumenty muzyczne, usta człowieka [5]. Np. odległość graniczna przed mówcą jest większa niż za nim, skutkiem czego mowa jest lepiej zrozumiała przez słuchaczy usytuowanych na wprost mówcy. Dla przeciętnego tempa mowy, zasięg dobrej zrozumiałości mowy odpowiada czterokrotnej odległości granicznej. W związku z zależnością odległości granicznej od częstotliwości, zasięg dobrej zrozumiałości mowy należy określać dla przedziału częstotliwości, dla którego czas pogłosu jest największy. Odległość graniczną dla źródeł kierunkowych podaje zależność (9)

$$r = 0.057\sqrt{QV/T} \quad (9)$$

gdzie  $Q$ : współczynnik kierunkowości źródła, wynoszący np. dla ust człowieka: 2.2, dla głośnika w zależności od rodzaju: od 3 do 9

### 1.6. JAKOŚĆ AKUSTYCZNA SALI

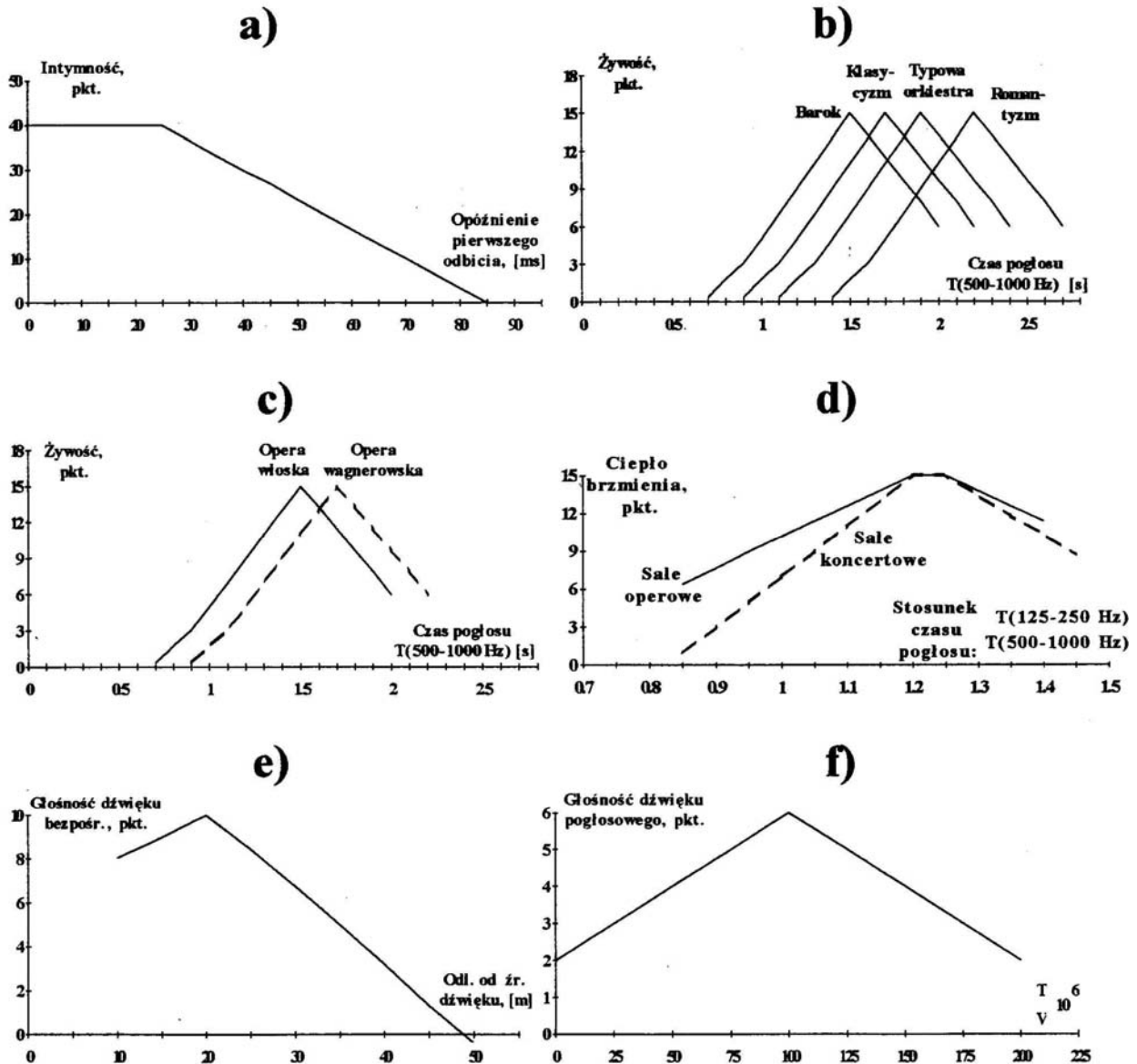
W potocznym rozumieniu, pojęcie jakości akustycznej pomieszczenia łączy się z szeroko rozumianą estetyką wytwarzanego w nim dźwięku. Sprawia to, że jakość akustyczną należy rozpatrywać w kontekście dopasowania akustyki pomieszczenia do jego funkcji. Innej akustyki wymaga zatem studio nagrań, świątynia, sala konferencyjna, kinowa, koncertowa itp.

Pojęcie jakości akustycznej ma naturę subiektywną, ma jednak ona wyraźny związek z parametrami akustycznymi pomieszczenia otrzymywanymi na drodze pomiarowej. W odniesieniu do sal koncertowych i operowych, związek ten został określony przez amerykańskiego akustyka Leo L. Beranka w latach 50-tych tego stulecia. Dokonał on szczegółowych pomiarów akustycznych ok. 60-ciu najlepszych sal na świecie, przeprowadzając jednocześnie badania ankietowe wśród słuchaczy koncertów symfonicznych i spektakli operowych. Badania te potwierdziły m.in. znany melomanom fakt, że subiektywne odczuwana jakość akustyczna sal wiąże się z charakterem wykonywanych w nich dzieł muzycznych [3],[4].

W wyniku badań przeprowadzonych przez Beranka ustalony został zespół subiektywnie odbieranych cech składających się na jakość akustyczną sali, a także zespół odpowiadających im parametrów akustycznych. Cechom tym zostały przypisane wagi (tj. liczby punktów), stosownie do wkładu tych cech w jakość akustyczną sali. W ten sposób możliwe stało się ilościowe określenie jakości akustycznej sali przez podanie łącznej liczby punktów.

- Ostatecznie, ocena jakości akustycznej sali metodą Beranka jest dokonywana w następujący sposób:
- mierzone są wybrane parametry akustyczne sali (Tabl. 2),
  - otrzymanym wartościom parametrów przypisane są ustalone przez Beranka wagi (liczby punktów), z uwzględnieniem wykonywanego w danej sali repertuaru muzycznego (rys. 2),
  - suma wag odpowiada akustycznej jakości sali wg skali przyjętej przez Beranka (Tabl. 3).

Maksymalna liczba punktów wynikających z parametrów wymienionych w Tabl. 2 wynosi 86, na 100 punktów przewidzianych przez Beranka. Pozostałych 14 punktów odpowiada nie wymienionym tu mniej istotnym cechom sali.



Rys. 2. Wagi przypisane parametrom akustycznym wymienionym w Tabelicy 2 (wg [2]):

- opóźnienie między falą bezpośrednią a najwcześniej dochodzącą falą odbitą,
- czas pogłosu w zakresie częstotliwości od 500 do 1000 Hz, dla sal koncertowych,
- iw., dla sal operowych,
- zawartość tonów niskich w pogłosie (przyjętą przez Beranka miarą tej zawartości jest stosunek czasu pogłosu w zakresach częstotliwości 125÷250 Hz i 500÷1000 Hz),
- głośność dźwięku bezpośredniego (miarą głośności jest odległość między dyrygentem a środkiem widowni),
- głośność dźwięku pogłosowego (miarą głośności jest stosunek czasu pogłosu w zakresie 500÷1000 Hz do objętości pomieszczenia).



**Tablica 2. Cechy subiektywne i odpowiadające im parametry akustyczne, mające największy wpływ na ocenę jakości akustycznej sali [2].**

Cecha subiektywna	Parametr akustyczny	Maks. waga
Intymność (ang. <i>Intimacy</i> )	Czas opóźnienia pierwszego odbicia	40
Żywość (ang. <i>Liveness</i> )	Średni czas pogłosu w zakresie 500÷1000 Hz $T_{500\div 1000}$	15
Ciepłość (ang. <i>Warmth</i> )	Stosunek czasów pogłosu $(T_{125}+T_{250})/(2T_{500\div 1000})$	15
Głośność dźwięku bezpośredniego	Odległość słuchaczy od dyrygenta	10
Głośność dźwięku pogłosowego	$10^6 T_{500\div 1000} / V$	6

Jak powiedziano wyżej, Beranek wykonał swoje badania w salach koncertowych i operowych. Ocena jakości akustycznej sal omawianą metodą nie stosuje się zatem do pomieszczeń o innej funkcji, można ją natomiast wykorzystać np. do oceny akustycznej przydatności audytorium do koncertów symfonicznych, świątyni do koncertów oratoryjnych, teatrów dramatycznych do inscenizacji operowych itp.

**Tablica 3. Klasyfikacja jakości akustycznej sal po uwzględnieniu wszystkich elementów oceny zawartych w metodzie Beranka [2].**

Liczba punktów	Jakość akustyczna sali
90-100	Doskonała
80-89	Bardzo dobra do doskonałej
70-79	Dobra do bardzo dobrej
60-69	Dostateczna do dobrej
50-59	Dostateczna
poniżej 50	Niezadowalająca

Program komputerowy "SABINE" umożliwia ocenę jakości akustycznej sal metodą Beranka. Do oceny wykorzystuje się jedynie te cechy subiektywne, które można określić metodą statystyczną, tj. żywość, ciepłość, głośność dźwięku bezpośredniego oraz głośność dźwięku pogłosowego. Odległość między dyrygentem a środkiem widowni, przyjęta przez Beranka jako miara głośności dźwięku bezpośredniego, jest w programie zastąpiona połową średniej drogi swobodnej (dla pomieszczeń o regularnym kształcie, jakimi są sale koncertowe, można założyć proporcjonalność między ww. odległością i średnią drogą swobodną).

Ze względu na ograniczenia metody statystycznej, w ocenie nie jest uwzględniana cecha o nazwie "Intymność". Odpowiadający jej parametr, tj. czas opóźnienia pierwszego odbicia, można wyznaczyć drogą wykreślną z przekroju i rzutu sali.

Sposób wyznaczenia czasu opóźnienia pierwszego odbicia z wykorzystaniem metody źródeł pozornych przedstawia rys. 3. Na przekroju sali pokazano źródło dźwięku A, źródła pozorne  $A_1$ ,  $A_2$  i  $A_3$ , obserwatora C i trzy punkty odbicia  $B_1$ ,  $B_2$  i  $B_3$ <sup>4</sup>. Dla oceny cechy „Intymność” należy wybrać taki punkt odbicia, aby odpowiadająca mu fala odbita dobiegała do obserwatora wcześniej od pozostałych i miała dużą energię, odbita od powierzchni słabo pochłaniającej dźwięk. Dla obserwatora usytuowanego na środku widowni jest to zwykle odbicie od sufitu, zaś dla usytuowanego w bocznej części widowni - odbicie od ściany.

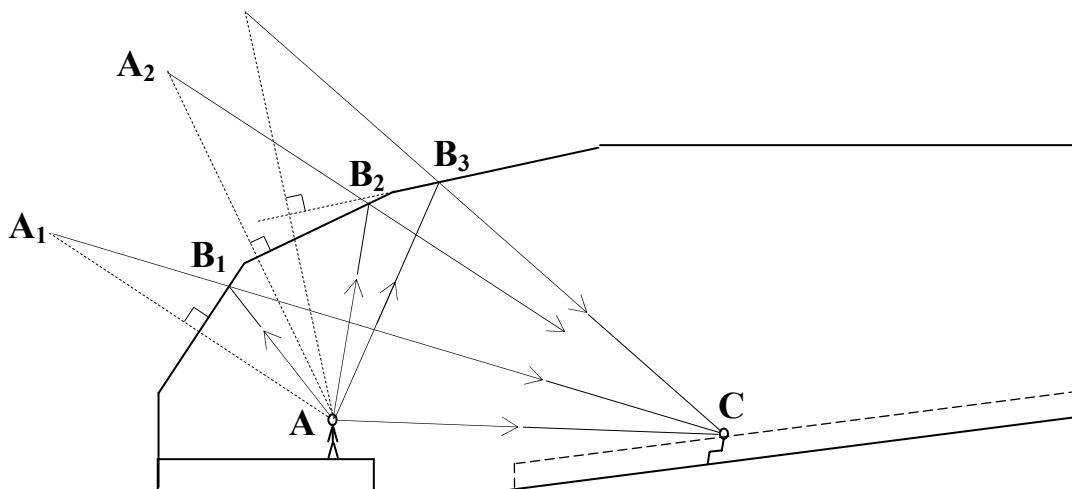
Poszukiwane opóźnienie można obliczyć z zależności (10):

$$\Delta t = (|AB_x| + |B_xC| - |AC|) / c \quad (10)$$

gdzie  $\Delta t$ : opóźnienie, [s],  
 $|AB_x|$ ,  $|B_xC|$ ,  $|AC|$ : długości odpowiednich odcinków z rys. 3, [m], należy przyjąć indeks x ( $x=1,2,3$ )  
dający najkrótszą drogę fali odbitej spośród pokazanych na rysunku  
c: prędkość dźwięku w powietrzu ( $c = 340$  m/s).

Po przedstawieniu  $\Delta t$  w milisekundach, należy odczytać odpowiednią liczbę punktów z rys. 2a.

<sup>4</sup> Położenie pozornych źródeł dźwięku wyznacza się zgodnie z zasadami optyki geometrycznej. Punkty  $A_1$ ,  $A_2$  i  $A_3$  są lustrzanymi odbiciami punktu A względem odpowiednich prostych tworzących profil sufitu, zaś punkty  $B_1$ ,  $B_2$  i  $B_3$  powstają z przecięcia odcinków  $A_1C$ ,  $A_2C$  i  $A_3C$  z ww. prostymi.



Rys. 3. Wyznaczanie dróg fali jednokrotnie odbitej w przekroju pomieszczenia przy użyciu metody źródeł pozornych. Opis w tekście.

## 2. OPIS PROGRAMU

### 2.1. MENU PROGRAMU

Program "SABINE" służy do obliczania akustycznych parametrów pomieszczeń przy użyciu statystycznej metody analizy pola akustycznego. Obliczenia są wykonywane w oparciu o połączoną z programem bazę danych, w której są opisane właściwości dźwiękochłonne podstawowych materiałów wykorzystywanych w akustyce pomieszczeń.

W celu uruchomienia programu należy otworzyć katalog roboczy i podać komendę "sabine". Po uruchomieniu programu, na ekranie jest wyświetlane menu główne. Po wybraniu hasła z menu głównego, wyświetlane jest odpowiednie sub-menu (rys. 4). Poszczególne hasła menu i sub-menu dotyczą następujących czynności:

Początek programu: rozpoczęcie obliczeń. Program żąda od użytkownika podania informacji dotyczących pomieszczenia (przeznaczenie, objętość, wystrój akustyczny) i wybrania wzoru użytego do obliczeń.

Koniec programu: zakończenie działania programu. Na życzenie użytkownika, informacje dotyczące pomieszczenia mogą zostać zapisane w zbiorze roboczym i powtórnie użyte w celu kontynuacji obliczeń. Dla utworzenia zbioru roboczego i zapisania danych należy przejść do opcji "Zapis zbioru roboczego".

Opis metody: informacja o metodzie statystycznej.

Odczyt zbioru roboczego: podanie nazw wszystkich zbiorów roboczych istniejących w aktualnym katalogu i przeczytanie zbioru wskazanego przez użytkownika.

Zapis zbioru roboczego: zapisanie zbioru roboczego. Przed zapisem program sprawdza, czy w aktualnym katalogu istnieje zbiór o podanej nazwie. Jeśli taki zbiór istnieje, zostanie on zastąpiony przez zbiór zapisywany. W celu zachowania zbioru istniejącego, zbiorowi zapisywanemu należy nadać inną nazwę.

Edycja czasów pogłosu: wyświetlenie na wspólnym wykresie krzywych czasu pogłosu w funkcji częstotliwości, pochodzących ze zbiorów roboczych wskazanych przez użytkownika. Możliwe jest wyświetlenie do 4-ch krzywych jednocześnie.

Kontynuacja obliczeń: opcja do której należy przejść po przeczytaniu zbioru roboczego lub po zapisaniu zbioru, a następnie kontynuowaniu obliczeń w tej samej sesji obliczeniowej.

Rodzaj pomieszczenia, Wzór na czas pogłosu, Objętość pomieszczenia, Wystrój pomieszczenia: zmiana aktualnego rodzaju pomieszczenia, wzoru na czas pogłosu, objętości lub wystroju pomieszczenia.

Wykres czasu pogłosu: wyświetlenie krzywej czasu pogłosu w funkcji częstotliwości wraz z zakresem wartości zalecanych przez literaturę dla pomieszczenia o rozpatrywanym przeznaczeniu i objętości.

Jakość akustyczna sali: określenie jakości akustycznej rozpatrywanego pomieszczenia (opcja dotyczy tylko sal koncertowych i operowych).

Odległość graniczna, Zakres zastosowania metody: podanie informacji o odległości granicznej i zakresie zastosowania metody dla rozpatrywanego pomieszczenia.

Baza danych: przeglądanie informacji o akustycznych właściwościach materiałów i dokonywanie zmian w bazie danych.

Przegląd bazy: przegląd poszczególnych pozycji bazy.

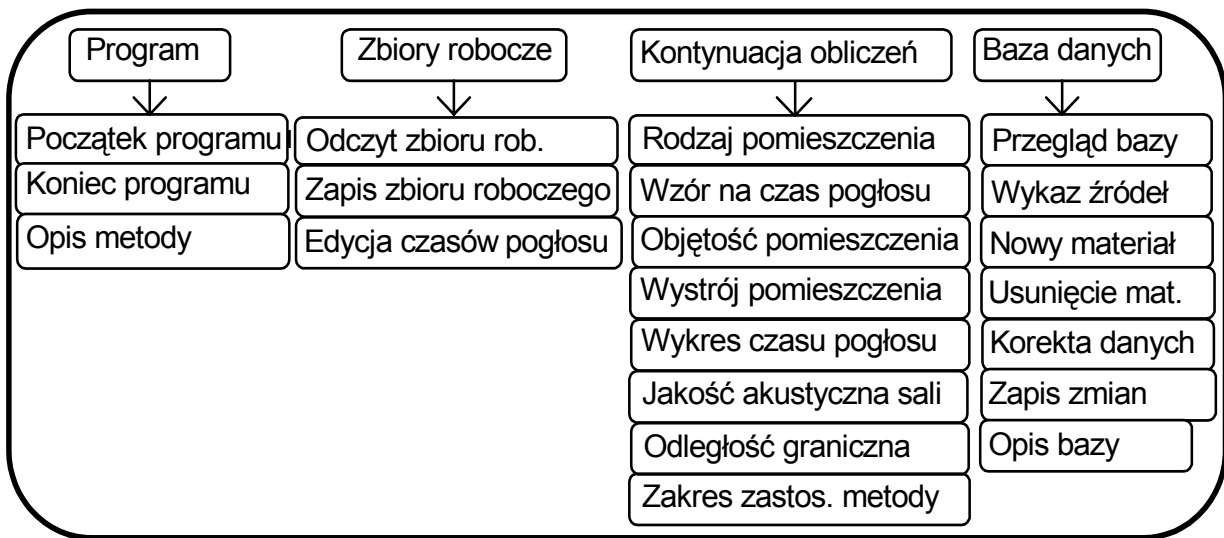
Wykaz źródeł: przegląd literatury, z której pochodzą informacje zgromadzone w bazie.

Nowy materiał, Usunięcie materiału: wprowadzanie nowej lub usunięcie wybranej przez użytkownika pozycji z bazy danych.

Korekta danych: korekta wybranej pozycji lub jej przemieszczenie w obrębie bazy.

Zapis zmian: zapisanie zmian w pliku dyskowym zawierającym zasoby bazy.

Opis bazy: podanie informacji o bazie danych.



Rys. 4. Menu główne (hasła w pierwszym wierszu) oraz sub-menu (hasła w kolumnach) programu "SABINE".

## 2.2. WZORY OBLICZENIOWE

Czas pogłosu  $T$  jest obliczany przy użyciu wzorów (11), (14), (17), (18), wg wyboru użytkownika:

Wzór Sabine'a: 
$$T = \frac{0.161 V}{S \alpha_{sr} + A_0} \quad (11)$$

gdzie  $V$ : objętość pomieszczenia w  $m^3$ ,

$S$ : całkowite pole powierzchni wewnętrznej pomieszczenia w  $m^2$ ,

$\alpha_{sr}$ : średnia ważona współczynników pochłaniania dźwięku  $\alpha_i$  poszczególnych ścian o polach powierzchni  $S_i$ :

$$\alpha_{sr} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i} \quad (12)$$

$A_0$ : łączna chłonność akustyczna obiektów znajdujących się w pomieszczeniu:

$$A_0 = \sum_{j=1}^J A_j \quad (13)$$

$A_j$  : chłonność akustyczna pojedynczego obiektu,  
 J: liczba obiektów w pomieszczeniu.

Wzór Sabine'a jest przeznaczony dla pomieszczeń słabo wytlumionych ( $\alpha_{sr} < 0.2$ , wartość A mała w porównaniu z  $S\alpha_{sr}$ ). Przy większych wartościach  $\alpha_{sr}$  wzór daje błędne wyniki. Np. dla pomieszczenia pustego i całkowicie wytlumionego ( $A=0$ ,  $\alpha_{sr}=1$ ), zamiast spodziewanego  $T=0$  odpowiadającego brakowi odbić otrzymuje się  $T=0.161V/S$ . W związku z rozwojem ujęcia Sabine'a i powstaniem całej rodziny wzorów wolnych od tego ograniczenia (patrz niżej), wzór Sabine'a ma znaczenie historyczne, jakkolwiek dzięki swojej prostocie nadal pozostaje w użyciu.

Wzór Eyringa: 
$$T = \frac{0.161 V}{-S \ln(1 - \alpha_{sr}) + A_0} \quad (14)$$

Wzór dla pomieszczeń o dowolnym stopniu wytlumienia, poszczególne materiały nie powinny jednak mocno różnić się co do właściwości dźwiękochłonnych, tj. ich współczynniki pochłaniania dźwięku  $\alpha_i$  nie powinny leżeć wyłącznie na skrajach zakresu  $\langle 0,1 \rangle$ . Tłumienie ośrodka nie jest uwzględnione, co powoduje, że przy objętości pomieszczenia powyżej 1000 m<sup>3</sup> i częstotliwości dźwięku powyżej 1000 Hz wynik staje się niedokładny.

W odróżnieniu od wzoru Sabine'a, wzór Eyringa można stosować dla wszystkich wartości  $\alpha_{sr}$ . Występujące w nim wyrażenie  $-\ln(1 - \alpha_{sr})$  można rozwinąć w szereg potęgowy

$$-\ln(1 - \alpha_{sr}) = \alpha_{sr} + \frac{\alpha_{sr}^2}{2} + \frac{\alpha_{sr}^3}{3} + \frac{\alpha_{sr}^4}{4} + \dots \quad (15)$$

którego pierwszy wyraz  $\alpha_{sr}$  występuje w mianowniku wzoru Sabine'a. Dla  $0 < \alpha_{sr} < 0.2$  różnica względna  $\Delta T$  między czasem pogłosu obliczonym każdym z tych wzorów nie przekracza ok. 9% (patrz niżej). Różnica ta wynika z pominięcia dalszych wyrazów szeregu we wzorze Sabine'a. Wielkość  $\Delta T$  rośnie szybko wraz ze wzrostem  $\alpha_{sr}$ , co ogranicza zakres stosowalności wzoru Sabine'a do  $\alpha_{sr} < 0.2$ .

$$\Delta T = \frac{\frac{0.161 V}{S\alpha_{sr}} - \frac{0.161 V}{-S \ln(1 - \alpha_{sr})}}{\frac{0.161 V}{S\alpha_{sr}}} * 100\% = \frac{\ln(1 - \alpha_{sr}) + \alpha_{sr}}{\ln(1 - \alpha_{sr})} * 100\% \cong \frac{-0.22 + 0.2}{-0.22} * 100\% \cong 9\% \quad (16)$$

Wzór Millingtona: 
$$T = \frac{0.161 V}{-\sum S_i \ln(1 - \alpha_i) + A_0} \quad (17)$$

Wzór dla pomieszczeń o mocno różniących się współczynnikach pochłaniania dźwięku przez poszczególne materiały. Wzór różni się od wzoru Sabine'a tym, że chłonność akustyczna pomieszczenia (wyrażenie w mianowniku) jest obliczana przez geometryczne uśrednianie współczynników  $\alpha_i$ , podczas gdy we wzorze Sabine'a - przez uśrednianie arytmetyczne. Tłumienie ośrodka nie jest uwzględnione. UWAGA: wzór nie może być stosowany, gdy chociaż jedna ściana pomieszczenia jest całkowicie wytlumiona (przy  $\alpha_i=1$  wystąpi nieoznaczoność w mianowniku, gdyż  $\ln(0) = -\infty$ ).

Wzór Knudsena:

$$T = \frac{0.161 V}{-S \ln(1 - \alpha_{sr}) + A_0 + 4mV} \quad (18)$$

Wzór analogiczny do wzoru Eyringa, lecz z uwzględnieniem tłumienia ośrodka ( $m$ : współczynnik pochłaniania dźwięku przez powietrze). Tłumienie to silnie rośnie wraz z częstotliwością (patrz Tabl. 4). Dla częstotliwości powyżej 6÷8 KHz jest ono tak silne, że w pomieszczeniu o kubaturze i wystroju odpowiadającym sali wykładowej średniej wielkości już po 1-2 odbiciach pochłanianie dźwięku przez ośrodek zaczyna dominować nad pochłanianiem przez powierzchnie ograniczające salę. Z tego m.in. powodu publikowane w literaturze charakterystyki częstotliwościowe  $\alpha(f)$  dotyczą pasma ograniczonego od góry do ok. 6÷8 KHz. Od dołu charakterystyki te zaczynają się od ok. 50÷100 Hz. Wynika to z coraz silniejszego występowania falowych zjawisk akustycznych wraz ze zmniejszaniem się częstotliwości (m.in. interferencje prowadzące do powstawania fal stojących), co ogranicza zakres stosowania teorii statystycznej.

**Tablica 4. Współczynnik  $m$  pochłaniania dźwięku przez powietrze o wilgotności względnej 50% i temperaturze 20° C.**

Częstotliwość, [Hz]	250	500	1000	2000	4000	8000
$m, [m^{-1}]$	0.00009	0.00025	0.0008	0.0025	0.007	0.02

Obliczona przez program zależność czasu pogłosu od częstotliwości jest konfrontowana z charakterystyką zalecaną przez literaturę dla pomieszczeń o danym przeznaczeniu i objętości. Na życzenie użytkownika, obliczona zależność wraz z przebiegiem zalecanym może zostać wydrukowana.

W związku z prostotą wzorów wynikających z metody statystycznej obliczenia komputerowe są jedynie usprawnieniem technicznym. Wszystkie obliczenia, zarówno dotyczące ćwiczeń jak i ew. projektowych zastosowań metody, można również wykonać w sposób tradycyjny, tj. przy użyciu kalkulatora.

Wzory (11), (14), (17), (18) odnoszą się do pomieszczeń, w których materiały pochłaniające i odbijające dźwięk są w przybliżeniu równomiernie rozłożone w pomieszczeniu, co sprzyja rozproszeniu dźwięku. Często spotykaną formą nierównomiernego rozkładu materiałów jest przypadek, gdy chłonność akustyczna przeciwległych par ścian znacząco się różni ( $A_x \neq A_y \neq A_z$ , np. pochłaniające ściany przy odbijającym suficie i podłodze). Warunek izotropowości pola nie jest wówczas spełniony, co prowadzi do dłuższego czasu pogłosu niż otrzymany przy użyciu wzorów wyżej omówionych. W takich przypadkach należy używać wzoru Fitzroy'a (19)<sup>5</sup>, dającego lepszą zgodność z rzeczywistą wartością czasu pogłosu. Wzór ten nie jest wykorzystywany w programie „SABINE”, można go użyć przy obliczeniach wykonywanych ręcznie.

$$T = - \frac{0.161 V}{S^2} \left[ \frac{S_x^2}{S_x \ln(1 - \alpha_x) + 4mV} + \frac{S_y^2}{S_y \ln(1 - \alpha_y) + 4mV} + \frac{S_z^2}{S_z \ln(1 - \alpha_z) + 4mV} \right] \quad (19)$$

gdzie  $S_x, S_y, S_z$  : powierzchnie par przeciwległych ścian w  $m^2$ ,  
 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  : średnie pogłosowe współczynniki pochłaniania dźwięku ww. par ścian.

### 2.3. BAZA DANYCH

Baza danych wchodząca w skład programu zawiera opis dźwiękochłonnych właściwości materiałów używanych w akustyce pomieszczeń. Materiały zawarte w bazie są podzielone na następujące grupy:

- podstawowe materiały budowlane,
- materiały tekstylne, porowate, płyty,
- ustroje z płyt i tworzyw,
- ustroje perforowane i szczelinowe,

<sup>5</sup> wg M. Rettinger: „Acoustic Design and Noise Control”, Chemical Publishing, New York 1977, vol. I: “Acoustic Design”

- pochłaniacze przestrzenne,
- publiczność, umeblowanie, inne,
- pojedyncze osoby i sprzęty

Każdy element bazy składa się ze słownego opisu materiału oraz energetycznych pogłosowych współczynników pochłaniania dźwięku  $\alpha$ . W ostatniej grupie, w miejsce współczynnika pochłaniania dźwięku podano chłonność akustyczną indywidualnych obiektów znajdujących się w pomieszczeniu (pojedyncze osoby i sprzęty, elementy wyposażenia itp.). Powyższe dane podano dla 6 pasm oktawowych o częstotliwościach środkowych od 125 do 4000 Hz.

Dane zawarte w bazie pochodzą z literatury. Wg normy ISO/R 354, współczynnik pochłaniania dźwięku odnosi się do płaskiej próbki materiału o polu powierzchni  $10 \div 12 \text{ m}^2$ . Podział materiału na fragmenty o mniejszym polu powierzchni lub pokrycie nim elementów przestrzennych, np. mebli lub elementów wystroju, może powodować wzrost współczynnika pochłaniania dźwięku, zwłaszcza dla wyższych częstotliwości. Podobnie, chłonność akustyczna  $A$  pojedynczego obiektu jest określana przez pomiar grupy obiektów zajmujących w rzucie powierzchnię  $10 \div 12 \text{ m}^2$ . Chłonność pojedynczego obiektu wynika z podziału zmierzonej chłonności przez liczbę obiektów.

Do bazy danych można dopisywać nowe materiały, które są dołączane na końcu grupy. Można również usuwać poszczególne pozycje, przemieszczać je w obrębie bazy lub korygować ich treść. Dane robocze, będące zestawem danych do przeprowadzenia obliczeń, zawierają m.in. numery wybranych przez użytkownika materiałów. Po dokonaniu zmian w bazie należy więc uaktualnić zbiory robocze.

### 3. ĆWICZENIA.

#### 3.1. ZAPOZNANIE SIĘ Z OBSŁUGĄ PROGRAMU

*Cel ćwiczenia: opis obsługi programu, wprowadzania danych, przechowania ich na dysku i interpretacji wyników. Ćwiczenie zawiera szkoleniowy przykład obliczeniowy. Ćwiczenie instruktażowe, nie jest wymagane sprawozdanie.*

3.1.1. Uruchomić opcję "BAZA DANYCH", zaś w niej opcję "PRZEGLĄD BAZY". Stosując się do wskazówek wyświetlanych w dolnej części ekranu, zapoznać się ze sposobem wybierania i wizualizacji poszczególnych pozycji bazy. Przećwiczyć wybieranie pozycji przez:

- wybór jednej z grup materiałów,
- przeoglądanie kolejnych pozycji (w tym opcja "POWTÓRZ OSTATNIO WYBRANY MATERIAŁ"),
- poszukiwanie pozycji spełniających jedno z poniższych kryteriów (opcja "PRZEGLĄD BAZY WG WZORCA"):
  - "Poszukiwany ciąg znaków w nazwie materiału" - używając tego kryterium można odszukać wszystkie materiały zawierające np. słowo "tynek", "wełna miner." (w ramach tej opcji nie używać polskich liter),
  - "Poszukiwany zakres zmienności funkcji  $\alpha(f)$ " - można odszukać np. wszystkie materiały silnie pochłaniające w całym paśmie ( $\alpha(f) > 0.6$ ), materiały silnie odbijające w całym paśmie ( $\alpha(f) < 0.03$ ), posiadające rezonans dla częstotliwości 500 Hz ( $f_{\text{rez}} = 500 \text{ Hz}$ ) itp. Wymienione materiały są odszukiwane po podaniu wartości  $\alpha(f)$  jak w Tab. 5.
  - podanie numeru pozycji (opcja "PODAJ NUMER MATERIAŁU").

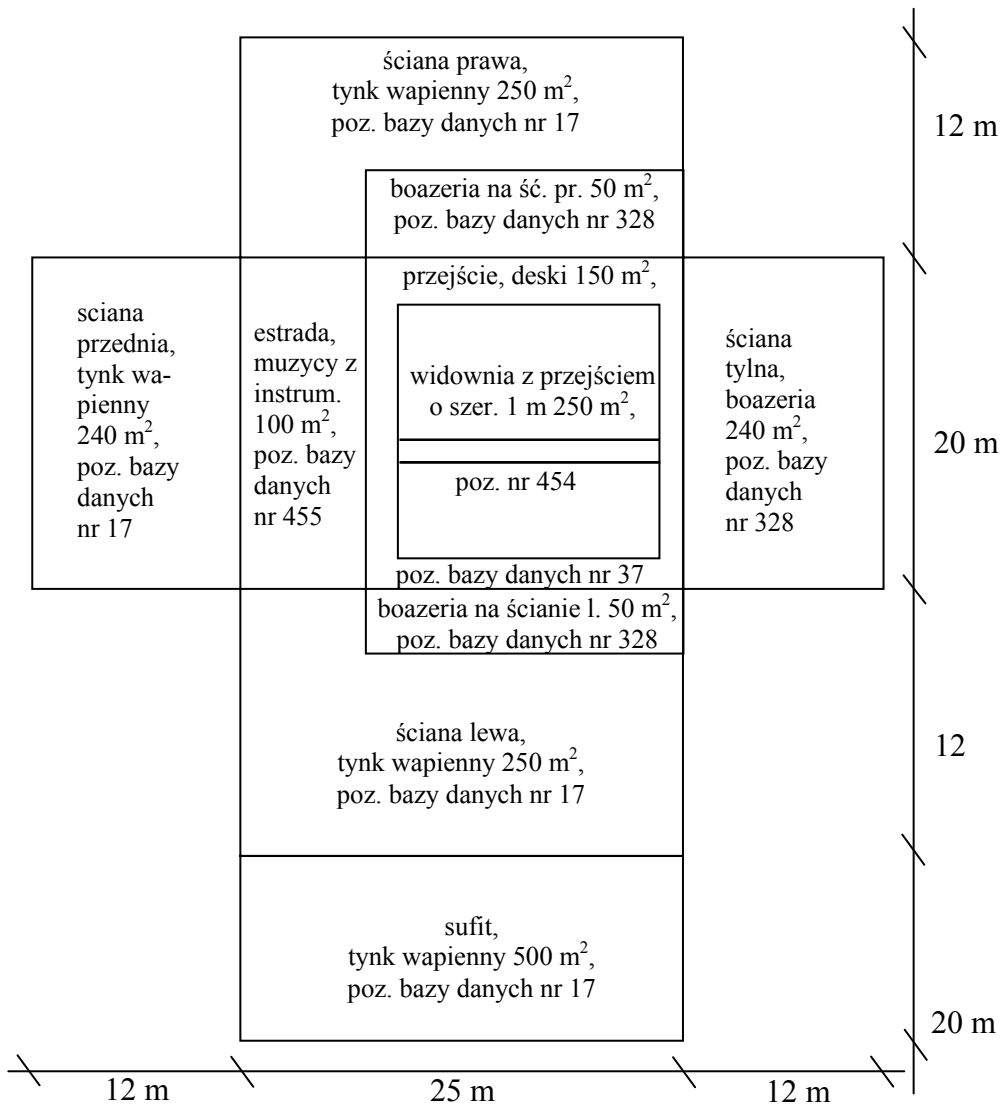
**Tab. 5. Przykładowe wartości  $\alpha(f)$  przy poszukiwaniu materiałów o zadanym zakresie zmienności**

$f$ , Hz		125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha(f) > 0.6$	kres górny	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	kres dolny	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$\alpha(f) < 0.03$	kres górny	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	kres dolny	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$f_{\text{rez}} = 500 \text{ Hz}$	kres górny	0.5	0.8	1.0	0.8	0.5	0.4
	kres dolny	0.2	0.3	0.5	0.3	0.3	0.2

Po wybraniu żądanej pozycji, program wyświetla częstotliwościową charakterystykę współczynnika pochłaniania dźwięku  $\alpha(f)$  lub chłonności akustycznej  $A(f)$ . Wybieranie nowej pozycji następuje po naciśnięciu dowolnego klawisza. Jeśli naciśnięto klawisz "e", program wyświetla nową charakterystykę wraz z poprzednią, co ułatwia ich porównanie (jednocześnie można wyświetlać do 4 krzywych).

3.1.2. Obliczyć czas pogłosu pomieszczenia pokazanego na rys. 5 (sala koncertowa o wymiarach 25x20x12m) oraz zapisać utworzony przykład na dysku. W tym celu wykonać następujące czynności, stosując się do wskazówek wyświetlanych w dolnej części ekranu:

- uruchomić opcję "PROGRAM", a w niej opcję "POCZĄTEK PROGRAMU",
- wprowadzić żądane przez program dane, udzielając następujących odpowiedzi na zapytania programu:  
 RODZAJ POMIESZCZENIA: sala koncertowa,  
 WZÓR NA CZAS POGŁOSU: Knudsen,  
 OBJĘTOŚĆ POMIESZCZENIA, [m<sup>3</sup>]: 6000,  
 PRZEGLĄD BAZY DANYCH: korzystając z opcji "PODAJ NUMER MATERIAŁU" wprowadzać kolejne pozycje wg Tabl. 6,
- uruchomić opcję "ZBIORY ROBOCZE" (w tym celu nacisnąć klawisz ESC), a w niej opcję "ZAPIS ZBIORU ROBOCZEGO", jako nazwę zbioru roboczego podać SALA1,
- uruchomić opcję "KONTYNUACJA OBLICZEŃ", a w niej opcję "WYKRES CZASU POGŁOSU". Na ekranie pokazana jest krzywa  $T(f)$ , ilustrująca zależność czasu pogłosu od częstotliwości, oraz zalecany



Rys. 5. Rozkład ścian pomieszczenia do przykładu obliczeniowego z Ćwiczenia 3.1

przez literaturę zakres przebiegu krzywej T(f). Zakres ten zależy od przeznaczenia i objętości pomieszczenia, jest on samoczynnie dobierany przez program do rozpatrywanego przykładu. Wystrój akustyczny pomieszczenia podany w Tabl. 6 jest tak dobrany, aby krzywa T(f) mieściła się w zalecanym zakresie.

3.1.3. Uruchomić opcję "JAKOŚĆ AKUSTYCZNA SALI". Skonfrontować wyświetloną informację z punktem 1.5 niniejszej instrukcji.

3.1.4. Uruchomić opcję "WYSTRÓJ POMIESZCZENIA". Posługując się wskazówkami z dolnej części ekranu, skorygować wykaz materiałów przez usunięcie części pozycji lub dodanie nowych. Zaobserwować wpływ tych zmian na przebieg krzywej T(f). Zapisać skorygowany wykaz materiałów w postaci zbioru roboczego SALA2 (sposób zapisywania zbiorów: patrz punkt 3.1.2).

3.1.5. Uruchomić opcję "ZBIORY ROBOCZE", a w niej opcję "ODCZYT ZBIORU ROBOCZEGO". Odczytać zbiór SALA1. Uruchomić opcję "OBJĘTOŚĆ POMIESZCZENIA" i zmienić objętość sali. Zaobserwować wpływ tych zmian na przebieg krzywej T(f). Zapisać skorygowany wykaz materiałów do zbioru roboczego SALA3.

3.1.6. Ponownie odczytać zbiór SALA1 i zastąpić aktualny rodzaj pomieszczenia innym z listy podanej przez program (opcja "RODZAJ POMIESZCZENIA"). Zaobserwować wpływ tej zmiany na zakres zalecanego przebiegu krzywej T(f). Zapisać aktualny zestaw danych do zbioru SALA4.

3.1.7. Uruchomić opcje "ZAKRES ZASTOSOWANIA METODY" i "ODLEGŁOŚĆ GRANICZNA". Skonfrontować wyświetloną informację z punktami 1.1 i 1.4.

3.1.8. Uruchomić opcję "ZBIORY ROBOCZE", a w niej opcję "EDYCJA CZASÓW POGŁOSU". Wczytać dotychczas utworzone zbiory robocze w kolejności od SALA1 do SALA4 i dokonać edycji krzywych T(f) na wspólnym wykresie. Ponownie wczytać zbiory w odwrotnej kolejności, tj. od SALA4 do SALA1. Zwrócić uwagę, że w obu przypadkach zakres zalecanych wartości czasu pogłosu, towarzyszący wyświetlanym krzywym, odpowiada pierwszemu z wczytanych zbiorów.

**Tablica 6. Zestawienie materiałów do przykładu obliczeniowego z Ćwiczenia 3.1**

Nr materiału	Nazwa materiału	Funkcja materiału	Pow. materiału, m <sup>2</sup>
17	Tynk wapienny na murze	sufit	500
328	Deski 1.2x25cm + wata szklana	ściana tylna	240
17	Tynk wapienny na murze	ściana przednia	240
17	Tynk wapienny na murze	ściana lewa	250
328	Deski 1.2x25cm + wata szklana	boazeria na ścianie lewej	50
17	Tynk wapienny na murze	ściana prawa	250
328	Deski 1.2x25cm + wata szklana	boazeria na ścianie prawej	50
455	Członek orkiestry z instrumentem	estrada	100
454	Widownia zapełniona z przejściem do 1 m	widownia	250
37	Deski strugane na posadzce	przejścia wokół widowni	150

## 3.2. PRZEGLĄD DŹWIĘKOCHŁONNYCH WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

*Cel ćwiczenia: przegląd dźwiękochłonnych właściwości materiałów wykorzystywanych w akustyce pomieszczeń oraz wpływu, jaki ma sposób wykorzystania tych materiałów na ich właściwości akustyczne. Ćwiczenie instruktazowe, nie jest wymagane sprawozdanie.*

3.2.1. Uruchomić opcję "BAZA DANYCH", zaś w niej opcję "PRZEGLĄD BAZY". Przejrzeć niżej wymienione grupy materiałów, reprezentujące cztery typowe przebiegi charakterystyk częstotliwościowych  $\alpha(f)$ . Kolejne grupy materiałów odszukać automatycznie przy użyciu opcji "PRZEGLĄD BAZY WEDŁUG



WZORCA”, wpisując odpowiednią liczbę w nawiasach klamrowych (np. “{1}”, “{2}” - znaki te umieszczono w bazie danych dla potrzeb niniejszego ćwiczenia). Wykorzystać możliwość jednoczesnego wyświetlania kilku charakterystyk.

- A. Materiały silnie odbijające dźwięk w całym zakresie częstotliwości: materiały budowlane o dużej masie własnej, spójnej strukturze i płaskiej powierzchni, np. beton, marmur, granit, szkło, ściana z cegły surowa lub tynkowana (symbol “{1}”). Dominującą formą odbicia dźwięku od tych materiałów jest odbicie lustrzane.
- B. Materiały o współczynniku pochłaniania rosnącym wraz z częstotliwością: materiały tekstylne, włókniste i porowate, np. dywany i wykładziny dywanowe, pianka poliuretanowa, filc miękki, wełna mineralna miękka (symbol “{2}”). Przebieg charakterystyki  $\alpha(f)$  wiąże się z pochłanianiem dźwięku w porach materiału. Wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie tłumienie drgań powietrza wypełniającego pory.
- C. Materiały silnie pochłaniające dźwięk w całym zakresie częstotliwości: umeblowanie miękko tapicerowane, większa grupa osób, np. miękkie fotele teatralne lub kinowe, widownia wypełniona publicznością (symbol “{3}”). Przebieg charakterystyki  $\alpha(f)$  wynika z dużego urozmaicenia geometrycznego powierzchni w połączeniu z jej właściwościami dźwiękochłonnymi. Dźwięk odbija się wówczas wielokrotnie między elementami powierzchni (np. między rzędami foteli lub między osobami tworzącymi większą grupę), ulegając jednocześnie odbiciu rozproszonemu. Taki sposób oddziaływania między polem akustycznym a powierzchnią prowadzi do silnego pochłaniania energii, zwłaszcza gdy struktura tej powierzchni, np. wysokość foteli, odległości między nimi itp., są porównywalne z długością fali.
- D. Materiały pochłaniające dźwięk w ograniczonym zakresie częstotliwości: boazerie szczelinowe, płyty perforowane, pochłaniacze przestrzenne itp., zwłaszcza montowane z odstępem od ściany lub sufitu, np. płyty pilśniowe lub gipsowe perforowane, pochłaniacze przestrzenne typu "deska" (symbol “{4}”). Przebieg charakterystyki  $\alpha(f)$  wynika z wystąpienia zjawiska rezonansu akustycznego w pustce między ścianą konstrukcyjną a warstwą pochłaniaczy lub danego materiału.

Inne postacie charakterystyki  $\alpha(f)$  wynikają z wystąpienia wielokrotnego rezonansu akustycznego (symbol “{5}”), wystąpienia rezonansu w zakresie niskich częstotliwości (stąd przebieg  $\alpha(f)$  opadający ze wzrostem częstotliwości, symbol “{6}”) i innych zjawisk akustycznych.

3.2.2. Zwrócić uwagę na zależność właściwości akustycznych materiałów od sposobu ich użycia:

- sfałdowanie kotary powoduje wzrost pochłaniania na średnich i wysokich częstotl. (symbol “{7}”),
- wzrost odległości między ścianą konstrukcyjną a ustrojem rezonansowym powoduje zmniejszanie się częstotliwości rezonansowej, co zwykle daje wzrost pochłaniania na niskich częstotl. (symbol “{8}”),
- perforacja materiału powoduje wzrost pochłaniania na wysokich częstotliwościach (symbol “{9}”),
- wytłumienie pustki za ustrojem rezonansowym powoduje wzrost pochłaniania (symbol “{10}”),
- zmiana kolejności warstw ustroju może zmienić jego właściwości akustyczne (symbol “{11}”),
- zwiększenie grubości materiałów włóknistych lub porowatych powoduje wzrost pochłaniania dźwięku (symbol “{12}”).

3.2.3. Zwrócić uwagę na brak powtarzalności danych dot. danego materiału, podawanych przez różnych autorów. Wynika to z różnic składu i faktury próbek, badanych w różnych laboratoriach. Wartości  $\alpha(f)$  zgromadzone w bazie należy zatem traktować jako ogólną informację, biorąc poprawkę na ich rozrzut wynikający z indywidualnych cech danej partii materiału.

Przykład rozrzutu współczynnika pochłaniania dźwięku takiego samego materiału, mierzonego w różnych laboratoriach: tynk wapienny, drewno politurowane, krzesła twarde, krzesła miękkie, fotele teatralne lub kinowe, publiczność na widowni (symbol “{13}”).

3.2.4. Część obiektów zgromadzonych w bazie danych opisuje współczynnik pochłaniania dźwięku  $\alpha$ , część zaś - chłonność akustyczna  $A$ . W kilku przypadkach występują podobne obiekty opisane zarówno w jeden, jak i w drugi sposób. Wynika to stąd, że ich właściwości dźwiękochłonne zależą od sposobu, w jaki są one usytuowane względem siebie. Mogą to być np. krzesła lub fotele teatralne ustawione w równych rzędach na

widowni, oraz te same krzesła rozstawione w pomieszczeniu w sposób swobodny, np. ustawione pod ścianą, przy stołach itp. Przykład różnicy w kształcie charakterystyki częstotliwościowej, jaka wynika z regularnego układu obiektów bądź ich indywidualnego potraktowania, pokazują pozycje zaopatrzone w symbol {14}.

Zwraca się uwagę, że właściwości akustyczne poszczególnych materiałów oraz obiektów opisanych w bazie danych odnoszą się do próbki o polu powierzchni  $10\div 12\text{ m}^2$ . Podział materiału na mniejsze fragmenty lub pokrycie nim elementów przestrzennych, np. mebli lub elementów wystroju, może powodować wzrost właściwości dźwiękochłonnych, zwłaszcza dla wyższych częstotliwości. Dla zachowania dokładności obliczeń, dany materiał powinien wystąpić w postaci płaskiej powierzchni o polu co najmniej  $10\div 12\text{ m}^2$ . Podobne zastrzeżenie odnosi się do indywidualnych obiektów - ich liczba i układ powinny odpowiadać warunkom pomiaru, tj. powinny one stanowić zwartą grupę o rzucie co najmniej  $10\div 12\text{ m}^2$ . W praktycznych sytuacjach, w większości przypadków warunki te nie są spełnione - powierzchnie pokryte danym materiałem często nie są płaskie, pole powierzchni jest małe, zaś indywidualne obiekty są użyte w pojedynczych egzemplarzach. Wyniki obliczeń należy wówczas traktować jako przybliżony.

### 3.3. OSZACOWANIE WPLYWU POCHŁANIANIA DŹWIĘKU PRZEZ POWIETRZE NA CZAS POGŁOSU POMIESZCZENIA

*Cel ćwiczenia: przedstawienie wpływu pochłaniania dźwięku przez powietrze na akustykę pomieszczenia w zależności od jego kubatury i chłonności akustycznej. Wymagane jest przygotowanie sprawozdania z ćwiczenia. Podstawa oceny: sposób przedstawienia i skomentowania wyników.*

3.3.1. Przed rozpoczęciem ćwiczenia przygotować szkice trzech pomieszczeń prostopadłościennych o prostych proporcjach boków (np. 5:3:2, 3:2:1 lub podobnych) i objętościach ok. 500, 1000 i 10000 m<sup>3</sup> (wykorzystać schemat z rys. 5). Obliczyć pola powierzchni ścian tych pomieszczeń.

3.3.2. Uruchomić opcję "PROGRAM", a w niej opcję "POCZĄTEK PROGRAMU". Jako rodzaj pomieszczenia wybrać "INNE", jako "PRZEWIDYWANY CZAS POGŁOSU" przyjąć "0" (ma to na celu usunięcie zakresu zalecanych wartości czasu pogłosu z wykresów T(f)). Do obliczeń przyjąć wzór Eyringa. Obliczyć czas pogłosu pomieszczenia o objętości 500 m<sup>3</sup> dla dwóch wersji wystroju:

- Wszystkie ściany pokrywają materiały silnie odbijające dźwięk (dla uproszczenia można przyjąć, że każda ze ścian jest pokryta materiałem jednego rodzaju, tj. na wystrój akustyczny pomieszczenia składa się co najwyżej 6 różnych materiałów). Zestaw danych zapisać w zbiorze roboczym.
- Wszystkie ściany pokrywają materiały silnie pochłaniające dźwięk. Nowy zestaw zapisać w następnym zbiorze.

3.3.3. Powtórzyć powyższe czynności dla pomieszczeń o objętościach 1000 m<sup>3</sup> i 10000 m<sup>3</sup>, zachowując te same materiały akustyczne. Powstałe zestawy danych zapisywać w kolejnych zbiorach roboczych. Wraz ze zbiorami powstałymi w punkcie 3.3.2, łączna ich liczba wynosi 6.

3.3.4. Odczytać każdy z zapisanych zbiorów, dokonać zmiany wzoru obliczeniowego z Eyringa na Knudsena (zmiana wzoru - patrz punkt 2.1) i zapisać na dysku z nową nazwą. Łączna liczba zbiorów wynosi teraz 12, z czego 6 nie uwzględnia, zaś 6 uwzględnia pochłanianie dźwięku przez powietrze (zbiory ze wzorem odpowiednio Eyringa i Knudsena).

3.3.5. Opracowanie wyników.

1. Naskikować kształt badanych pomieszczeń wraz z charakterystykami  $\alpha(f)$  użytych materiałów.
2. Na wspólnym wykresie przedstawić charakterystykę częstotliwościową czasu pogłosu, obliczoną z uwzględnieniem i bez uwzględnienia pochłaniania dźwięku przez powietrze dla każdego z badanych pomieszczeń (wykorzystać opcję "EDYCJA CZASÓW POGŁOSU"; zwrócić uwagę, że wobec zainicjowania obliczeń w sposób podany w p. 3.3.2, zalecana wartość czasu pogłosu jest równa zeru).
3. Sprawdzić czy pasmo częstotliwości dla którego dokonano obliczeń leży w zakresie stosowności metody statystycznej.

4. Dla każdego pomieszczenia obliczyć krzywą  $\Delta T(f)\%$  (zmniejszenie się czasu pogłosu wskutek pochłaniania wyrażone w % - łącznie 6 krzywych, tj. 3 pomieszczenia x 2 wersje wystroju):

$$\Delta T(f)\% = \frac{T_E(f) - T_K(f)}{T_E(f)} 100\% \quad (20)$$

gdzie  $T_E(f)$ ,  $T_K(f)$ : charakterystyki częstotliwościowe czasu pogłosu obliczone przy użyciu wzoru odpowiednio Eyringa i Knudsena.

Obliczone krzywe pogrupować w sposób najlepiej ilustrujący badane zagadnienie.

5. Skomentować przedstawione wyniki. Wyjaśnić, dlaczego pochłanianie dźwięku przez powietrze rośnie wraz ze wzrostem objętości pomieszczenia. Ustosunkować się do wpływu całkowitej chłonności akustycznej pomieszczenia na otrzymane wyniki.

### 3.4. PROJEKT AKUSTYCZNEGO WYSTROJU POMIESZCZENIA

*Cel ćwiczenia: poznanie ogólnych zasad akustycznego projektowania sal, opracowanie uproszczonego projektu akustycznego sali z uwzględnieniem wpływu stopnia wypełnienia widowni na akustykę. Wymagane jest przygotowanie sprawozdania z ćwiczenia. Podstawa oceny: zgodność formy opracowania z ogólnie przyjętymi wymaganiami dot. przedstawienia projektu, sposób skomentowania wyników.*

3.4.1. Przed rozpoczęciem ćwiczenia przygotować szkic projektowanego pomieszczenia, obliczyć pola powierzchni ścian oraz elementów wystroju mających wpływ na jego właściwości. Przykłady pomieszczeń do wykorzystania:

- sala audytoryjna o kubaturze ok. 1500 m<sup>3</sup> i powierzchni podłogi ok. 400 m<sup>2</sup>,
- sala koncertowa o kubaturze ok. 8000 m<sup>3</sup> i powierzchni podłogi ok. 700 m<sup>2</sup>,
- kościół o kubaturze ok. 20000 m<sup>3</sup> i powierzchni podłogi ok. 900 m<sup>2</sup>.

W przypadku sal koncertowych, teatralnych itp., kubatura sali powinna spełniać zalecenia podane w Tabl. 7.

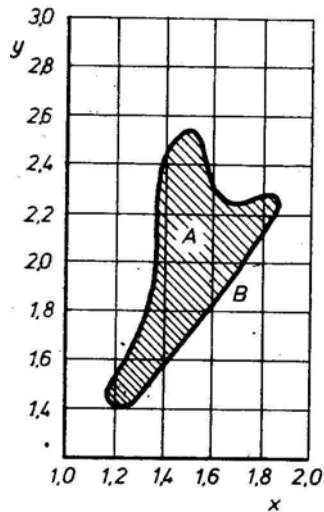
**Tablica 7. Zalecana kubatura pomieszczeń przeznaczonych do bezpośredniego słuchania (wg [2])**

Przeznaczenie sali	Kubatura na 1 osobę, m <sup>3</sup>
Sale kinowe	3 - 4
Sale do słuchania mowy i muzyki lekkiej (teatry, sale chóru, audytoria, sale konferencyjne)	4 - 7
Sale koncertowe dla muzyki symfonicznej	7 - 10

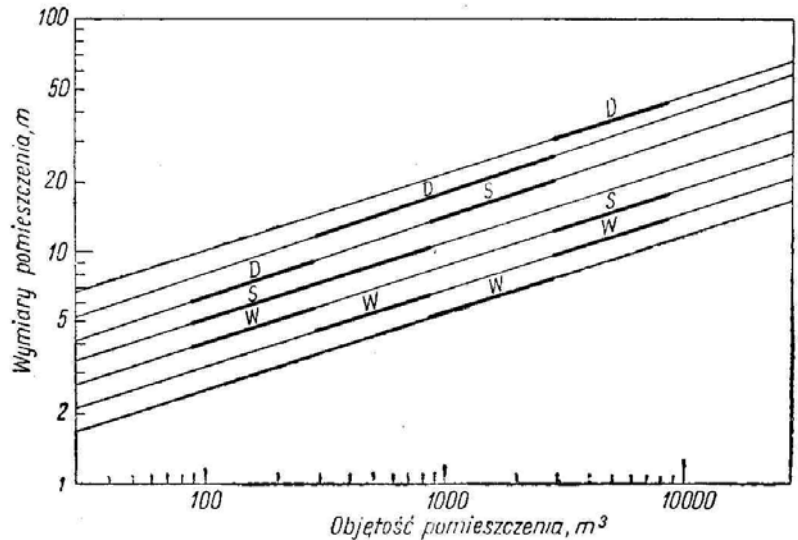
3.4.2. Opracować kształt sali dobierając odpowiednią wysokość sali, a także stosując łamanie i profilowanie ścian oraz sufitu. Prawidłowy kształt sali powinien spełniać następujące kryteria:

- Proporcje między długością, szerokością i wysokością powinny być odpowiednio dobrane (przykładowe proporcje: patrz rys. 6 i 7). Np. wymiary pomieszczenia 4x8.8x7.2 m dają proporcje 1:2.2:1.8, którym odpowiada punkt leżący wewnątrz zakresowanego obszaru na rys. 6. Obszar ten obejmuje zakres prawidłowych proporcji pomieszczeń prostopadłościennych.
- Dźwięk padający ze sceny lub estrady i ulegający odbiciu od ścian i sufitu powinien równomiernie nagłaśniać widownię (patrz rys. 8).
- Opóźnienie między falą bezpośrednią a najwcześniej dochodzącą falą odbitą od sufitu lub ścian powinno być jak najmniejsze. Opóźnienie należy oszacować dla przedniej, środkowej i tylnej części widowni na podstawie kierunków biegu fal pokazanych na rys. 8 (sposób określenia opóźnienia i zakres preferowanych wartości: patrz rys. 3 i 2a).

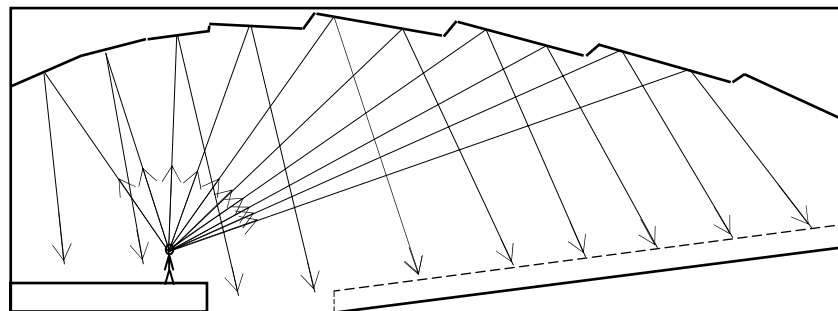
3.4.2. Przyjąć, że pomieszczenie jest wykończony materiałami silnie odbijającymi dźwięk, bez elementów wyposażenia, foteli itp. (przykładowe rozwiązanie: na ścianach i suficie tynk lub płyty gipsowo-kartonowe pełne, na podłodze pokrycie twarde – gres, parkiet lub podobne). Zapisać utworzony przykład w zbiorze o nazwie "stan\_0". UWAGA: Obliczony czasu pogłosu może odbiegać od wartości zalecanych. Jest to prawidłowe, gdyż wartości zalecane odpowiadają pomieszczeniu wykończonemu materiałami akustycznymi i całkowicie zapehionemu.



Rys. 6. Proporcje geometryczne małych i średnich sal prostopadłościennych o wymiarach zredukowanych do postaci 1: x:y. A – najkorzystniejsze, zapewniające równomierny rozkład najmniejszych częstotliwości drgań własnych pomieszczenia, B – niekorzystne, przy których występuje interferencja dwóch lub więcej rodzajów drgań własnych pomieszczenia [2].



Rys. 7. Optymalne wymiary sal prostopadłościennych. W – wysokość, D – długość, S – szerokość. Sale małe (80 - 300 m<sup>3</sup>): W:S:D= 1:1.25:1.6; sale średnie (300 - 800 m<sup>3</sup>): W:S:D= 1:1:6:2.5; sale niskie (800 - 3000 m<sup>3</sup>): 1:2.5:3.2; sale długie (300 - 8000 m<sup>3</sup>): 1: 1.25:3.2. Punkty przecięcia grubych odcinków linii ukośnych z prostą pionową odpowiadającą określonej objętości wyznaczają najkorzystniejszy stosunek W:S:D [2].



Rys. 8. Przekrój sali z profilem sufitu, zapewniającym równomierne nagłośnienie widowni dźwiękiem odbitym.

3.4.3. Dobrać wystrój akustyczny pomieszczenia dostosowany do jego przeznaczenia i zapewniający uzyskanie zalecanej charakterystyki częstotliwościowej czasu pogłosu. Jeśli spełnienie tego warunku wymaga użycia materiałów o zróżnicowanych właściwościach akustycznych, ich układ w sali powinien być zgodny z następującymi wymaganiami:

- korzystne jest, gdy współczynnik pochłaniania dźwięku poszczególnych powierzchni rośnie wraz z odległością od estrady (tj. materiały silnie odbijające dźwięk należy umieszczać w pobliżu estrady,

materiały średnio pochłaniające - w środkowej i tylnej części sali, materiały najsilniej pochłaniające - na tylnej ścianie),

- efektywność materiałów i ustrojów najsilniej pochłaniających dźwięk, zwłaszcza wykazujących właściwości rezonansowe, jest największa, gdy są one umieszczone w narożach sali oraz wzdłuż spojenia sufitu ze ścianami,
  - korzystne jest, gdy zdolność poszczególnych powierzchni lub elementów wystroju do rozpraszania dźwięku rośnie wraz z odległością od estrady (tj. w przedniej części sali należy umieszczać duże, płaskie powierzchnie, zaś najbardziej rozrzeźbione w tylnej części sali, zwłaszcza na tylnej ścianie).
- Przyjąć całkowite wypełnienie widowni publicznością. Jeśli zalecenia projektowe dotyczące kubatury, kształtu i wystroju sali są sprzeczne ze sobą, przyjęte rozwiązania projektowe powinny być kompromisem między nimi. Zapisać utworzony przykład w zbiorze o nazwie "100%".

3.4.4. Przy zachowaniu poprzednio dobranego wystroju, obliczyć czas pogłosu dla pomieszczenia pustego (w tym celu, po wybraniu opcji "Wystrój pomieszczenia", w miejsce pozycji "publiczność na widowni" lub "osoby siedzące na krzesłach" przyjąć puste fotele lub krzesła). Zapisać utworzony przykład w zbiorze o nazwie "0%". UWAGA: Podobnie jak poprzednio, czasu pogłosu może odbiegać od wartości zalecanych.

#### 3.4.5. Opracowanie wyników.

Sprawozdanie z ćwiczenia składa się z części projektowej i z komentarza.

Część projektową zatytułować: "Wytyczne akustyczne do projektu architektonicznego". Część ta powinna mieć charakter projektu technologicznego dotyczącego branży akustycznej, sporządzonego w sposób zgodny z ogólnymi wymaganiami dla opracowań projektowych. Projekt powinien zawierać następujące elementy:

- Nazwa obiektu wraz z danymi liczbowymi: długość, szerokość i wysokość, kubatura, liczba miejsc na widowni.
  - Założenia projektowe: formy wykorzystania obiektu przewidziane w projekcie, formy drugoplanowe, wymagana kubatura na osobę, zalecany czas pogłosu.
  - Rzut i przekrój pomieszczenia z zaznaczonym biegiem fal odbitych od ścian i sufitu oraz opóźnieniem między falą bezpośrednią a odbitą podanym dla przedniej, środkowej i tylnej części widowni. Przy wyznaczaniu kierunku biegu fal odbitych wykorzystać metodę źródeł pozornych.
  - Opis wykończenia pomieszczenia, podany w formie przyjętej w projektach architektonicznych. Opis powinien zawierać informacje niezbędne dla sporządzenia pełnego projektu obiektu. W niezbędnych przypadkach podać sposób montażu ustrojów akustycznych i załączyć prosty szkic konstrukcyjny.
- Część projektową zaopatrzyć w Załącznik, zawierający:
- Przykładowe położenie źródła dźwięku oraz odpowiadający mu zasięg dobrej zrozumiałości mowy dla źródła izotropowego oraz dla źródła kierunkowego (np. ust człowieka lub głośnika), naszkicowane na rzucie pomieszczenia. Zasięg dla źródła kierunkowego  $z_k$  obliczyć na podstawie zależności  $z_k = z\sqrt{Q}$ , gdzie  $z$ : zasięg dla źródła izotropowego podany przez program,  $Q$ : współczynnik kierunkowości źródła.
  - Wykaz materiałów pokrywających ściany oraz odpowiadające im charakterystyki  $\alpha(f)$ .
  - Charakterystyki czasu pogłosu  $T(f)$ , obliczone dla pomieszczenia bez materiałów akustycznych oraz w stanie wykończonym (pustego i wypełnionego w 100%), przedstawione na wspólnym wykresie. Charakterystyki zaopatrzyć w informację, czy pasmo częstotliwości dla którego dokonano obliczeń leży w zakresie stosowalności metody statystycznej.
  - Ręcznie wykonane obliczenia czasu pogłosu dla wypełnienia 100% i częstotliwości  $f=1$  kHz. Wyniki tych obliczeń podać zgodnie z Tab. 8. Porównać wynik obliczeń ręcznych i otrzymanych z programu oraz wyjaśnić ewentualną różnicę.

Komentarz powinien zawierać następujące elementy:

1. Porównać uzyskaną kubaturę na osobę, obliczony czasu pogłosu oraz czas opóźnienia pierwszego odbicia z wartościami zalecanymi oraz skomentować, jakie znaczenie dla akustyki pomieszczenia mają ewentualne rozbieżności.
2. Wymienić uproszczenia zawarte w metodzie statystycznej i podać, jak one wpływają na zgodność otrzymanych wyników z warunkami, występującymi w rzeczywistym pomieszczeniu.
3. Podać jakie elementy, poza zawartymi w ćwiczeniu, powinien zawierać pełny projekt akustyczny pomieszczenia.

**Tablica 8. Czas pogłosu, zapelnienie pomieszczenia: 100%, częstotliwość f=1 kHz**

i	Nazwa materiału	Wsp. pochł. dźwięku $\alpha_i$ , f=1000 Hz	Pole pow. $S_i$ , $m^2$
1	tynk		
2	wykładzina dywanowa		
...	...		
...	...		
Powierzchnia całkowita $S = \sum S_i$ [ $m^2$ ]			
Chłonność akustyczna $A = \sum \alpha_i S_i$ [ $m^2$ ]			
Średni wsp. pochł. dźwięku $\alpha_{sr} = A/S$			
Czas pogłosu $T = 0.161V/...$ [s] ( $V = ... m^3$ )			

### 3.5. OCENA JAKOŚCI AKUSTYCZNEJ POMIESZCZENIA

*Cel ćwiczenia: poznanie kryteriów jakości akustycznej pomieszczeń z wykorzystaniem sali z ćw. 3.4 lub przykładu własnego. Wymagane jest przygotowanie sprawozdania z ćwiczenia. Podstawa oceny: sposób przedstawienia i skomentowania wyników.*

3.5.1. Wczytać zbiór roboczy zawierający dane pomieszczenia z ćwiczenia 3.4 lub wprowadzić przykład podany w ćwiczeniu 3.1. Uruchomić opcję “JAKOŚĆ AKUSTYCZNA SALI” i określić liczbę punktów, możliwych do określenia metodą statystyczną.

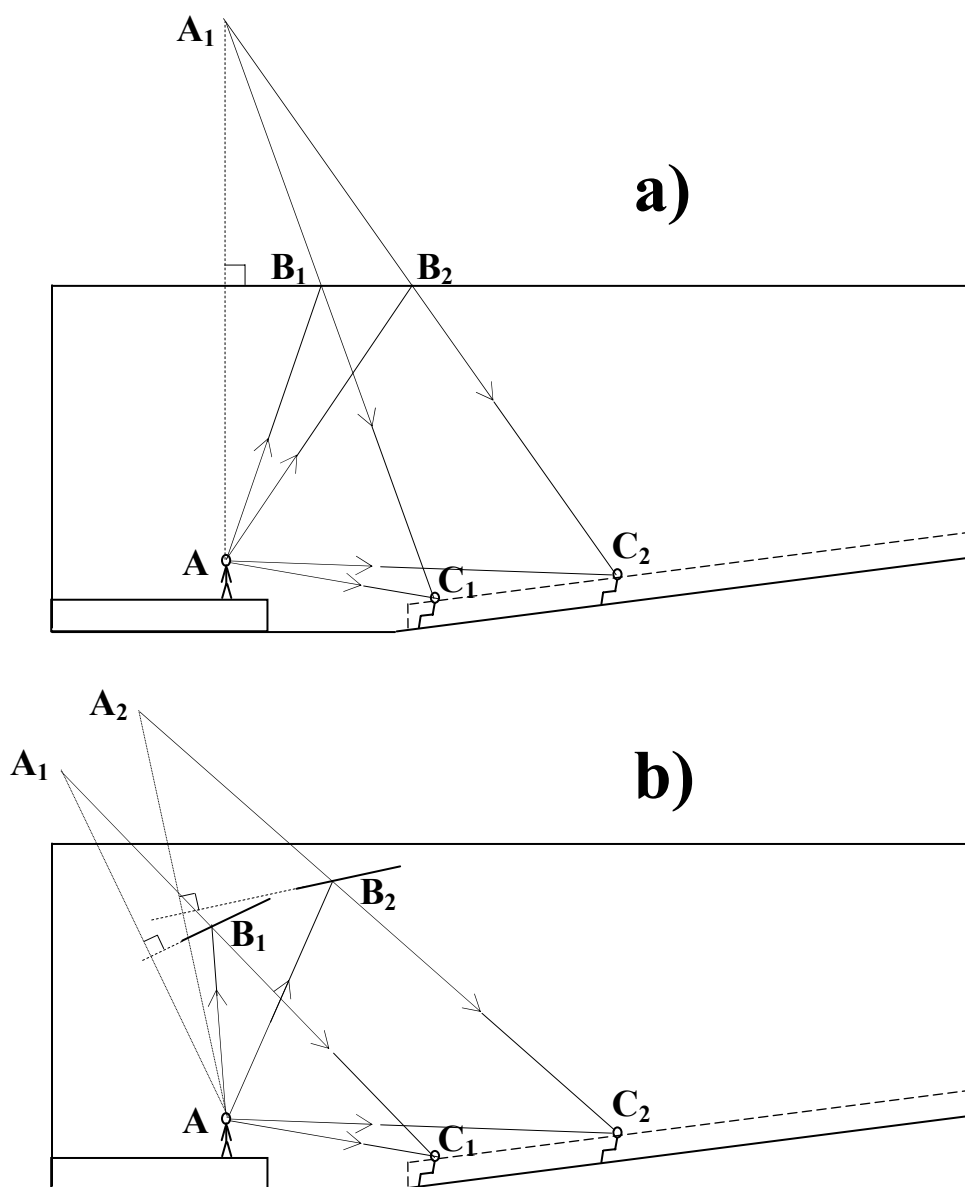
3.5.2. Sporządzić rzut i przekrój badanego pomieszczenia. Wykorzystując rys. 2a, określić liczbę punktów odpowiadających za cechę “Intymność” dla trzech punktów obserwacji: w przedniej, środkowej i tylnej części widowni.

3.5.3. Jeśli źródłem dźwięku jest głos ludzki lub instrumenty muzyczne nie wspomagane głośnikami, nad estradą lub przednią częścią widowni umieścić ekrany akustyczne skracające czas opóźnienia dźwięku odbitego od sufitu. Należy zmierzać do otrzymania możliwie małego opóźnienia, aby liczba punktów odpowiadających za cechę „Intymność” była jak największa (patrz rys. 2a), przy zachowaniu wymagań związanych z architektonicznym rozwiązaniem wnętrza. Ekrany powinny być płaskie, o najmniejszym wymiarze ok. 150 cm lub więcej. Kształt ekranów dowolny, z wykluczeniem koła, kwadratu i prostokąta o proporcjach 1:2. Przyjąć materiał silnie odbijający dźwięk (np. płyta gipsowo-kartonowa, płyta drewnopochodna, tynk na siatce, poliwęglan pełny – gr. ok. 2 cm). Przekrój pomieszczenia w którym jest celowe zastosowanie ekranów pokazuje rys. 9.

3.5.3. Zsumować dotychczas uzyskane punkty dla poszczególnych punktów obserwacji. Liczba punktów możliwych do otrzymania w p. 3.5.1 i 3.5.3 wynosi odpowiednio 46 i 40, łącznie 86, podczas gdy maksymalna liczba punktów na skali ocen Beranka wynosi 100. W związku z tym należy zwiększyć uzyskaną liczbę punktów o 7. Odpowiada to uwzględnieniu mniej istotnych cech sali, nie omówionych w rozdz. 1.5 [2]. Cechom tym odpowiada maksymalnie 14 punktów, w ramach ww. uzupełnienia należy przyjąć połowę z nich .

3.5.4. Na podstawie łącznej liczby punktów określić jakość akustyczną sali wg Tab. 3 dla każdego punktu obserwacji. Określić jakość akustyczną sali bez ekranów i z ekranami, przy 100% i 0% zapelnienia widowni.

3.5.5. Omawiany przykład zakłada wykorzystanie pomieszczenia jako sali koncertowej. Wykorzystując opcję “RODZAJ POMIESZCZENIA” zmienić sposób wykorzystania pomieszczenia na salę operową i ponownie określić jej jakość akustyczną.



Rys. 9. Przekrój pomieszczenia (a) przed i (b) po umieszczeniu ekranów skracających drogę dźwięku odbitego od sufitu. Oznaczenia jak na rys. 3.

### 3.5.6. Opracowanie wyników.

W sprawozdaniu z ćwiczenia zamieścić:

- Nazwę obiektu wraz z danymi liczbowymi: długość, szerokość i wysokość, kubatura, liczba miejsc na widowni i na estradzie.
- Przewidywane pierwszo- i drugoplanowe formy wykorzystania obiektu, wymagana kubatura na osobę i zalecany czas pogłosu.
- Jeśli badano inne pomieszczenie niż w Ćwiczeniu 4, podać jego rzut i przekrój z zaznaczonym biegiem fal odbitych od ścian i sufitu oraz opóźnieniem między falą bezpośrednią a odbitą dla przedniej, środkowej i tylnej części widowni, dla przypadku z ekranami i bez ekranów sufitowych. Podać, o ile skrócił się czas opóźnienia fali odbitej po zastosowaniu ekranów.
- Wykresy zawierające uzyskane wyniki. Zaproponować sposób czytelnego zilustrowania wyników dla 3-ch punktów obserwacji.

- Komentarz do badanego przykladu. W komentarzu odpowiedziec na nastepujace pytania:
- skad wynika nierownomierny rozklad jakosci akustycznej badanej sali (np. dlaczego w jednej czesci widowni jakosc jest lepsza niz w innych),
- w jaki sposob mozna poprawic jakosc akustyczna badanej sali.

### 3.6. OBLICZANIE WPLYWU WYTUMIENIA POMIESZCZENIA NA POZIOM DZWIEKU W POLU POGLOSOWYM

*Cel cwiczenia: badanie zaleznosci miedzy wystrojem akustycznym pomieszczenia a poziomem dzwieku. Wymagane jest przygotowanie sprawozdania z cwiczenia. Podstawa oceny: sposob przedstawienia i skomentowania wynikow.*

3.6.1. Przed rozpoczeciem cwiczenia przygotowac szkic pomieszczenia prostokatnego o wymiarach ok. 10x20x6m, wg schematu z rys. 5 Założyć, że pomieszczenie jest halą przemysłową, naszkicować przykładowe położenie maszyn i stanowisk pracy.

3.6.2. Uruchomić opcję "PROGRAM", a w niej opcję "POCZĄTEK PROGRAMU". Dobrać wystrój akustyczny dostosowany do przeznaczenia pomieszczenia. Sufit i ściany pokryć materiałem silnie odbijającym dźwięk (np. tynk, szkło okienne).

3.6.3. Przyjąć, że poziom dźwięku w polu pogłosowym wynosi 90 dB z płaską charakterystyką częstotliwości. Wytłumić pomieszczenie w takim stopniu, aby charakterystyka częstotliwościowa poziomu dźwięku nie przekraczała krzywej N85 (I wariant) i N80 (II wariant). Sposób obliczania poziomu dźwięku w poszczególnych pasmach częstotliwości po wytłumieniu oraz informację o krzywych oceny hałasu N podano w punktach 1.2 i 1.3.

Pomieszczenie wytłumiać przez:

- podwieszenie pod sufitem ustrojów dźwiękochłonnych (np. pochłaniacze przestrzenne, ustroje typu "deska"),
- pokrycie materiałem dźwiękochłonnym części ścian położonych w pobliżu źródeł hałasu,
- ustawienie ekranów dźwiękochłonnych wokół stanowisk pracy, itp.

Wytłumiając pomieszczenie starać się spełnić ogólnie przyjęte wymogi dotyczące wystroju hal przemysłowych (wybierać elementy ściennie odporne na uszkodzenia mechaniczne, ustawiając ekrany przewidzieć drogi transportu, przy wyborze materiałów pokrywających ściany i sufit uwzględnić bezpieczeństwo p-poz. itp.).

3.6.4. Opracowanie wyników.

1. Naszkicować kształt badanego pomieszczenia wraz z wykazem użytych materiałów przed i po wytłumieniu oraz z odpowiadającymi im charakterystykami  $\alpha(f)$ .
2. Na wspólnym wykresie przedstawić charakterystyki częstotliwościowe czasu pogłosu przed i po wytłumieniu pomieszczenia.
3. Sprawdzić czy pasmo częstotliwości dla którego dokonano obliczeń leży w zakresie stosowności metody statystycznej.
4. Na wspólnym wykresie przedstawić charakterystyki częstotliwościowe poziomu dźwięku przed i po wytłumieniu pomieszczenia. Przy każdej charakterystyce podać odpowiadający jej poziom dźwięku  $L_{lin}$  oraz  $L(A)$  (patrz punkt 1.3).
5. Omówić uproszczenia zawarte w metodzie statystycznej i podać, jak one wpływają na zgodność otrzymanych wyników z warunkami, występującymi w rzeczywistym pomieszczeniu. Wymienić powody dla których te uproszczenia zostały włączone do metody. Podać metody projektowe wolne od tych uproszczeń oraz omówić korzyści i ograniczenia, jakie daje ich użycie.



#### 4. LITERATURA.

- [1] I. Malecki: "Teoria fal i układów akustycznych". PWN, Warszawa 1964.
- [2] J. Sadowski: "Akustyka w urbanistyce, architekturze i budownictwie". Arkady, Warszawa 1971.
- [3] A. Witkowski: "Kryteria obiektywnej oceny jakości akustycznej pomieszczeń". Przegląd Techniki, Radio i Telewizja w Publikacjach Zagranicznych, nr 4, 1994, str. 46-52.
- [4] A. Witkowski, A. Kulowski: "Subiektywna ocena jakości akustycznej pomieszczeń". Przegląd Techniki, Radio i Telewizja w Publikacjach Zagranicznych, nr 2, 1996, str. 1-6.
- [5] Z. Żyszkowski: "Podstawy elektroakustyki". PWN, Warszawa 1987.
- [6] A. P. G. Peterson, E. E. Gross: "Handbook of noise measurements". General Radio, Concord MA, 1972.