

Aparaty słuchowe a akustyka pomieszczeń

Hearing aids and room acoustics

Roman Gołębiewski

Instytut Akustyki, Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

STRESZCZENIE

Celem pracy było przedstawienie głównych aspektów związanych z propagacją fali akustycznej w pomieszczeniu, w kontekście zapewnienia odpowiedniego stopnia zrozumiałości mowy. W pracy pokazano, że stosując kierunkowe źródło dźwięku oraz mikrofon kierunkowy, możliwe jest zwiększenie tzw. odległości krytycznej. Jest to odległość, w której wpływ pola bezpośredniego i pogłosowego jest taki sam. Zwiększając odległość graniczną zwiększamy obszar wokół źródła, w którym dominuje fala bezpośrednia wpływająca korzystnie na stopień zrozumiałości mowy.

Słowa kluczowe: aparat słuchowy, akustyka pomieszczeń, czas pogłosu, kierunkowość

SUMMARY

The main purpose of the paper was to present the main aspects related to the propagation of acoustic wave in the room in the context of ensuring a high degree of speech intelligibility. The work shows that using a directional sound source and a directional microphone, it is possible to increase the so-called critical distance. This is the distance at which the effect of direct and reverberation fields is the same. By increasing the critical distance, we increase the area around the source in which a direct wave dominates, which positively affects the degree of speech intelligibility.

Key words: hearing aid, room acoustics, reverberation time, directivity

1. Wprowadzenie

Propagacja dźwięku oraz jego percepcja w pomieszczeniu znacząco różni się od propagacji i percepcji w przestrzeni otwartej. W przestrzeni otwartej na wartość amplitudy fali akustycznej wpływa przede wszystkim fala bezpośrednia oraz ewentualnie fala odbita od powierzchni ziemi. W przestrzeniach zamkniętych (pomieszczeniach) oprócz fali bezpośredniej, fali odbitej od podłoża, występuje jeszcze szereg fal odbitych od ścian pomieszczenia oraz sufitu. Amplituda tych fal oraz ich czas dotarcia do słuchacza wpływają m.in. na zrozumiałość mowy oraz percepcję dźwięków muzycznych.

Należy podkreślić, że większość sytuacji akustycznych, w których znajduje się słuchacz (osoba niedosłysząca) znajduje się w zamkniętych pomieszczeniach. Niestety, w przeważającej części – sytuacje te, pod względem akustycznym, należy uznać za złe. Oznacza to, że przekaz słowny lub muzyczny jest utrudniony. Dla przykładu w pomieszczeniach o „złej akustyce” problem z percepcją dźwięku mają osoby normalnie słyszące, a jeszcze w większym stopniu osoby niedosłyszące – szczególnie z odbiorczym niedosłuchem.

W kontekście osób niedosłyszących, należy również pamiętać, że cały proces diagnozowania słuchu oraz dopasowania aparatów słuchowych odbywa się również w pomieszczeniu zamkniętym. Zwykle badania te odbywają się w pomieszczeniach o dobrych warunkach akustycznych – pomieszczeniach przystosowanych do tego typu badań. Z tego powodu niezwykle istotne jest, aby protetyk słuchu umiał przewidzieć ewentualne problemy, które mogą się pojawić, gdy osoba niedosłysząca będzie znajdować się w innych – z reguły trudniejszych warunkach akustycznych.

2. Propagacja dźwięku w polu swobodnym

Natężenie fali akustycznej w polu swobodnym od punkтового (wymiary źródła są bardzo małe w porównaniu z odległością od źródła), wszechkierunkowego źródła dźwięku można określić z następującej zależności:

$$I = W / (4\pi r^2), \quad (1)$$

gdzie W oznacza moc akustyczną źródła, natomiast r odległość od źródła.

W odpowiednio dużej odległości od źródła, falę kulistą można uznać za falę płaską. Przy tym założeniu można wykorzystać następującą zależność pomiędzy natężeniem fali akustycznej, I , a średnim kwadratem ciśnienia akustycznego, $\langle p^2 \rangle$:

$$I = \langle p^2 \rangle / \rho c, \quad (2)$$

gdzie ρ jest gęstością powietrza ($\rho = 1.21 \text{ kg/m}^3$), natomiast c – prędkością propagacji dźwięku w powietrzu ($c = 340 \text{ m/s}$). Iloczyn ρc jest impedancją akustyczną ośrodka.

Korzystając z zależności (2) wzór (1) możemy przepisać w postaci:

$$\langle p^2 \rangle = W \rho c / (4\pi r^2). \quad (3)$$

Wykorzystując definicję poziomu ciśnienia akustycznego w postaci:

$$L_p = 10 \log (\langle p^2 \rangle / p_o^2), \quad p_o = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}, \quad (4)$$

można pokazać, że

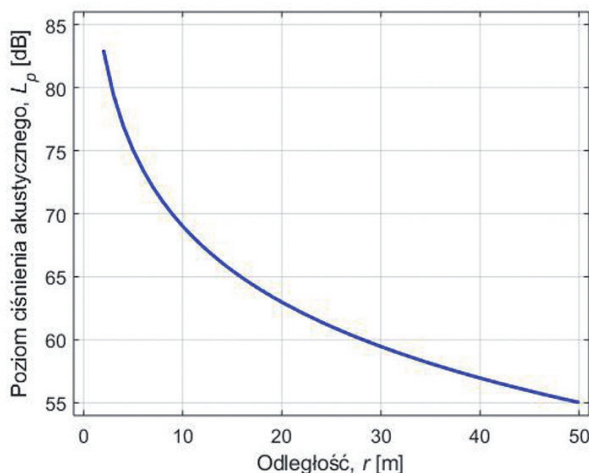
$$L_p = L_W + 10 \log (s_o / (4\pi r^2)), \quad s_o = 1 \text{ m}^2, \quad (5)$$

gdzie L_W jest poziomem mocy akustycznej źródła, który wynosi:

$$L_W = 10 \log (W / W_o). \quad (6)$$

W powyższym wzorze W_0 jest mocą odniesienia, która wynosi $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

Zależność (5) przedstawia poziom ciśnienia akustycznego w odległości r od punkowego źródła dźwięku. Poniżej na rysunku przedstawiono zmianę poziomu ciśnienia akustycznego z odległością, przy założeniu, że poziom mocy akustycznej źródła wynosi 100 dB.



Rys. 1. Zmiana poziomu ciśnienia akustycznego wraz z odległością od źródła dźwięku

Z zależności (5) oraz z przebiegu zmian poziomu ciśnienia akustycznego z odległością (Rys. 1) wynika, że w polu swobodnym, przy podwojeniu odległości od źródła, poziom ciśnienia akustycznego spada o 6dB.

3. Propagacja dźwięku w pomieszczeniu

Propagacja dźwięku w pomieszczeniu znacząco różni się od propagacji dźwięku w polu swobodnym. Natężenie fali akustycznej w polu pogłosowym przedstawia się następującą zależnością:

$$I = 4W/R, \quad (7)$$

gdzie wielkość R jest tzw. stałą pomieszczenia zdefiniowana zależnością:

$$R = A/(1 - \alpha_{sr}). \quad (8)$$

W powyższym wzorze wielkość α_{sr} jest średnim współczynnikiem pochłaniania pomieszczenia, natomiast wielkość A oznacza chłonność akustyczną:

$$A = \sum_i S_i \alpha_i, \quad (9)$$

przy czym S_i oznacza pole powierzchni i -tej ściany (powierzchni) pomieszczenia, natomiast α_i jest współczynnikiem pochłaniania i -tej ściany (powierzchni). Wielkość A jest miarą pochłaniania fali dźwiękowej w pomieszczeniu.

Średni współczynnik pochłaniania definiuje się jako iloraz:

$$\alpha_{sr} = (\sum_i S_i \alpha_i) / S, \quad (10)$$

gdzie S jest całkowitym polem powierzchni ścian znajdujących się w pomieszczeniu.

Korzystając z powyższej zależności chłonność akustyczną oraz stałą pomieszczenia zapisać można w następującej postaci:

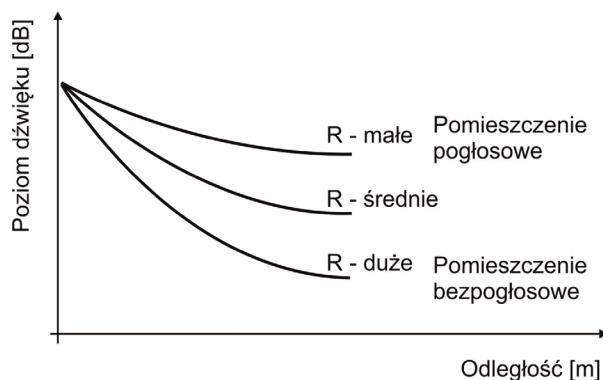
$$A = S \cdot \alpha_{sr}, \quad (11)$$

oraz

$$R = (S \cdot \alpha_{sr}) / (1 - \alpha_{sr}). \quad (12)$$

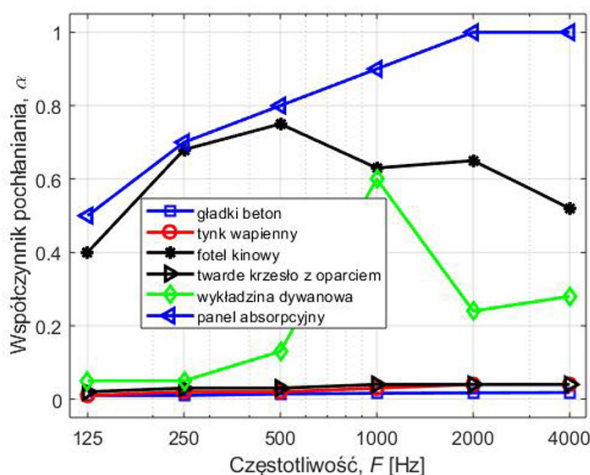
Jak wynika z zależności (7), natężenie fali akustycznej maleje wraz ze wzrostem wartości stałej pomieszczenia R , która z kolei rośnie wraz ze wzrostem chłonności akustycznej.

Na Rys. 2 przedstawiono jak zmienia się poziom dźwięku w funkcji odległości od źródła dla różnych stałych pomieszczenia.



Rys. 2. Zmiana poziomu ciśnienia akustycznego wraz z odlegością od źródła dźwięku dla różnych wartości stałej pomieszczenia

Od czego zależy współczynnik pochłaniania i jaki jest wpływ na warunki akustyczne w pomieszczeniu? Wartość współczynnika α danej powierzchni zależy od rodzaju materiału, z jakiego jest wykonana oraz od częstotliwości. Poniżej na rysunku przedstawiono przykładowe wartości współczynnika pochłaniania dla wybranych powierzchni występujących w pomieszczeniach. Jak widać wartość współczynnika pochłaniania bardzo silnie zależy od częstotliwości – wraz z jej wzrostem wzrasta również wartość współczynnika pochłaniania.



Rys. 3. Współczynnik pochłaniania dla kilku wybranych powierzchni występujących w pomieszczeniach, w zależności od częstotliwości sygnału

Całkowita wartość natężenia fali akustycznej w pomieszczeniu (suma natężenia w polu swobodnym oraz w polu pogłosowym) wynosi:

$$I = W/(4\pi r^2) + 4W/R. \quad (13)$$

W przypadku kierunkowego źródła dźwięku powyższą zależność należy przepisać w następującej formie:

$$I = \Phi W/(4\pi r^2) + 4W/R, \quad (14)$$

gdzie Φ oznacza współczynnik kierunkowości źródła dźwięku.

Poniżej w tabeli przedstawiono wartości współczynnika kierunkowości w zależności od położenia źródła dźwięku.

Tab. 1. Wartości współczynnika kierunkowości w zależności od położenia źródła dźwięku

Lokalizacja źródła	Współczynnik kierunkowości Φ
W otwartej przestrzeni (np. źródło zawieszone pod sufitem)	1
Na płaskiej powierzchni (np. na podłodze)	2
Połączenie dwóch ścian (np. podłogi i ściany)	4
Połączenie trzech ścian (np. podłogi i dwóch ścian)	8

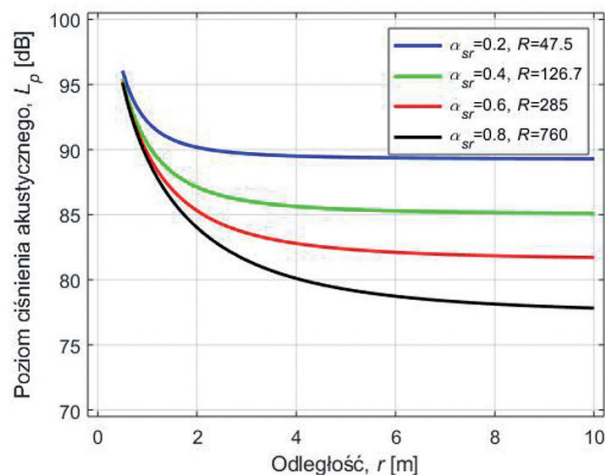
Korzystając z zależności (1) oraz definicji poziomu ciśnienia akustycznego (wzór (4)), można pokazać, że poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu wynosi:

$$L_p = L_W + 10 \log((\Phi S_0)/(4\pi r^2) + (4S_0)/R), \quad (15)$$

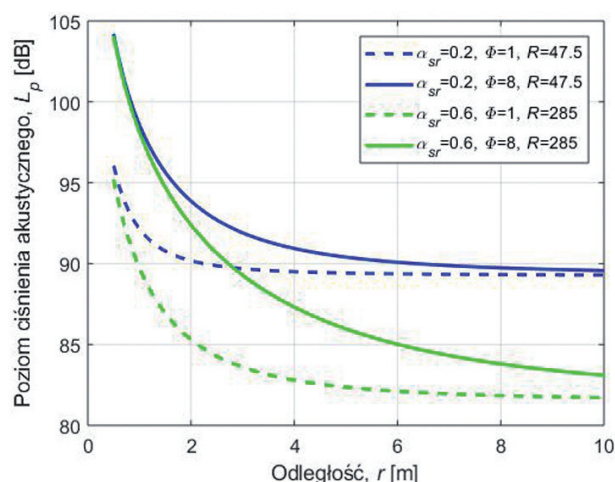
gdzie L_W jest poziomem mocy akustycznej zdefiniowany zależnością (6).

Na Rys. 4 przedstawiono wyniki obliczeń poziomu ciśnienia

akustycznego w funkcji odległości od źródła dźwięku (zgodnie ze wzorem (15)), dla różnych wartości średniego współczynnika pochłaniania dźwięku w pomieszczeniu, a co za tym idzie dla różnych wartości stałych pomieszczenia (wzór (8)). Obliczenia przeprowadzono dla pomieszczenia o wymiarach 10.0/5.0/3.0 m (długość/szerokość/wysokość). Jak widać, w małych odległościach od źródła dźwięku współczynnik pochłaniania pomieszczenia praktycznie nie wpływa na wartość poziomu ciśnienia akustycznego. Wraz ze wzrostem odległości od źródła dźwięku, wartość średniego współczynnika pochłaniania silnie wpływa na wartość poziomu ciśnienia akustycznego. Im większa wartość współczynnika α_{sr} tym spadek wartości L_p jest większy. Wzrost wartości współczynnika pochłaniania od 0.2 do 0.8 sprawia, że różnica w wartości poziomu ciśnienia akustycznego w odległości kilku metrów od źródła dźwięku wynosi ponad 10dB! Wyniki obliczeń przedstawione na Rys. 4 przeprowadzono przy założeniu, że wartość współczynnika kierunkowości (w zależności od położenia źródła dźwięku) wynosi $\Phi = 1$ (źródło wszechkierunkowe). Na kolejnym rysunku (Rys. 5) przedstawiono wyniki obliczeń poziomu ciśnienia akustycznego dla dwóch wartości średniego współczynnika pochłaniania pomieszczenia oraz dla dwóch wartości współczynnika kierunkowości. Dla takiej samej wartości średniego współczynnika pochłaniania, wartość współczynnika kierunkowości wpływa na poziom ciśnienia akustycznego w małych odległościach od źródła dźwięku. W skrajnych przypadkach ($\Phi = 1$ – źródło wszechkierunkowe – źródło zawieszone pod sufitem oraz $\Phi = 8$ – źródło umieszczone na połączeniu trzech ścian) różnica w wartościach poziomu ciśnienia akustycznego sięga do 10dB. To oznacza, że kierunkowość źródła dźwięku wpływa na rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w bliskich odległościach od źródła dźwięku.



Rys. 4. Poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu dla różnych stałych pomieszczenia ($\Phi = 1$)



Rys. 5. Poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu dla różnych wartości współczynnika Φ

Jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących pomieszczenie pod względem akustycznym jest czas pogłosu. Jest to czas, po którym poziom dźwięku, od momentu wyłączenia źródła dźwięku, spada o 60dB. Czas pogłosu jest wielkością bezpośrednio mierzalną. Można go również obliczyć wykorzystując jeden z dwóch poniższych wzorów – w zależności od wartości średniego współczynnika pochłaniania:

- dla $\alpha_{sr} \leq 0.2$ (pomieszczenia niewytłumione – o małej chłonności akustycznej) stosuje się wzór Sabine’a w postaci:

$$T = 0.161V/A \text{ [s]}, \quad (16)$$

gdzie V [m³] oznacza objętość pomieszczenia, natomiast wielkość A jest chłonnością akustyczną.

- dla $\alpha_{sr} > 0.2$ (pomieszczenia wytłumione – o średniej i dużej chłonności akustycznej) stosuje się wzór Eyringa w postaci:

$$T = 0.161V/(-S \cdot \ln(1 - \alpha_{sr})) \text{ [s]}. \quad (17)$$

W literaturze znaleźć można jeszcze inne zależności, z których można wyznaczyć czas pogłosu [1]. Czas pogłosu jest parametrem w oparciu, o który bardzo często określa się kryteria oceny właściwości akustycznych pomieszczeń.

4. Kryteria oceny właściwości akustycznych pomieszczeń

Jest wiele parametrów w oparciu, o które można zdefiniować kryteria określające właściwości akustyczne pomieszczeń. Pomieszczenie, które można uznać za dobre pod względem akustycznym powinno spełniać następujące warunki:

- odpowiedni mały poziom zakłóceń zewnętrznych,
- dobra zrozumiałość mowy (zrozumiałość mowy w pomieszczeniu będzie przedmiotem rozważań w kolejnym rozdziale),
- dobra percepcja dźwięków muzycznych,

- równomierne nagłośnienie (taki sam poziom ciśnienia akustycznego w każdym punkcie pomieszczenia),
- brak pogłosu (echa).

Niski poziom zakłóceń zewnętrznych w pomieszczeniu można zapewnić poprzez odpowiednio wysoką izolacyjność akustyczną ścian pomieszczenia oraz jego odpowiednie usytuowanie. W zakresie wymagań dotyczących poziomu hałasu wewnątrz pomieszczeń stosuje się odpowiednie normy [2, 3].

Ocena pomieszczenia pod względem akustycznym uzależniona jest od przeznaczenia danego pomieszczenia. W jednym przypadku podstawowym kryterium oceny pomieszczenia będzie dobra zrozumiałość mowy, a w innym – dobra percepcja dźwięków muzycznych. W obu jednak przypadkach, w pomieszczeniu powinien być zapewniony równomierny rozkład poziomu ciśnienia akustycznego, który uzależniony jest od odpowiednich warunków pogłosowych oraz odpowiedniego rozproszenia energii akustycznej. Zapewnienie równomiernego nagłośnienia wymaga w wielu przypadkach odpowiedniego skierowania (w określone miejsca pomieszczenia) energii odbitych od ścian fal akustycznych lub zastosowania odpowiedniego systemu nagłośnienia. Zapewnienie równomiernego nagłośnienia jest możliwe poprzez odpowiednie ukształtowanie pomieszczenia (szczególne znaczenie ma tutaj kształt sufitu).

W zależności od przeznaczenia pomieszczenia w literaturze można znaleźć różne zalecenia dotyczące optymalnych wartości czasu pogłosu. W Tab. 2 przedstawiono zalecane wartości czasu pogłosu dla pasm częstotliwości 500 – 1000 Hz, w zależności od przeznaczenia pomieszczenia. Jak widać z tej tabeli, dla pomieszczeń, w których najważniejszym kryterium jest zapewnienie odpowiednio wysokiej zrozumiałości mowy – czas pogłosu powinien być krótki.

Tab. 2. Optymalne wartości czasu pogłosu dla pasma częstotliwości 500 – 1000 Hz w zależności od przeznaczenia pomieszczenia [4]

Przeznaczenie pomieszczenia	Optymalny czas pogłosu [s]
Sale chóru	1.0 ÷ 1.3
Sale kinowe	1.1 ÷ 1.4
Teatry dramatyczne (słowne)	1.2 ÷ 1.5
Teatry wielofunkcyjne	1.3 ÷ 1.6
Teatry operowe	1.4 ÷ 1.7
Studia muzyczne, radiowe	1.5 ÷ 1.8
Sale koncertowe	1.7 ÷ 2.0
Kościoły	2.5 ÷ 3.0

5. Metody polepszenia zrozumiałości mowy w pomieszczeniu

Jedną z głównych przyczyn powodujących słabą zrozumiałość mowy w pomieszczeniu, szczególnie w przypadku osób niedosłyszących, jest mała wartość wielkości SNR (ang. Signal to Noise Ratio). Wielkość SNR określa wzajemną relację pomiędzy sygnałem użytecznym, S (mową), a sygnałem zakłócającym, N (hałasem):

$$\text{SNR} = S/N \text{ [dB]}. \quad (18)$$

Wielkość SNR można również zapisać w innej postaci:

$$\text{SNR} = 10 \log(A_S/A_N)^2, \quad (19)$$

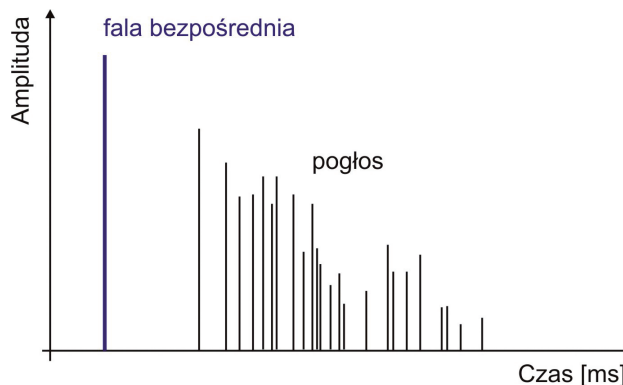
gdzie A_S oznacza amplitudę sygnału mowy, natomiast A_N – amplitudę sygnału zakłócającego. W przypadku, gdy $A_S > A_N$ (sygnał mowy jest głośniejszy od hałasu) wówczas wartość SNR jest dodatnia. Jeśli $A_S < A_N$ wówczas wartość SNR jest ujemna.

Osoby normalnie słyszące potrafią słyszeć i osiągać dobry stopień zrozumiałości mowy, nawet wtedy, gdy wartość SNR jest ujemna. W przypadku osób niedosłyszących, szczególnie z niedosłuchem odbiorczym, aby zapewnić wysoki stopień zrozumiałości mowy, wartość SNR musi być zdecydowanie wyższa (dodatnia). Szacuje się, że poprawa wielkości SNR o 1dB pozwala polepszyć stopień zrozumiałości mowy o ok. 8-10% - przy czym uzależnione jest to od wielkości niedosłuchu. Im większy niedosłuch – tym wymagana jest większa poprawa SNR.

Aby zwiększyć wartość SNR i jednocześnie polepszyć zrozumiałość mowy można stosować urządzenia wspomagające, takie jak systemy FM czy pętle indukcyjne. Rozwiązania te pozwalają zwiększyć wartość SNR nawet o kilkanaście decybeli. Są to zatem bardzo dobre i efektywne metody polepszenia zrozumiałości mowy.

Kolejnym sposobem zwiększenia stopnia zrozumiałości mowy osób niedosłyszących w pomieszczeniu jest zastosowanie kierunkowego źródła dźwięku oraz mikrofonu kierunkowego. Analiza wpływu tych dwóch elementów na warunki akustyczne w pomieszczeniu będzie przedmiotem rozważań w dalszej części niniejszej pracy.

Na warunki pogłosowe w pomieszczeniu wpływ mają dwa czynniki: wczesne i późne odbicia fal akustycznych od ścian pomieszczenia (Rys. 6). Wczesne odbicia docierają do uszu słuchacza w czasie poniżej 50ms od dotarcia fali bezpośredniej [5]. Wczesne odbicia wzmacniają amplitudę fali bezpośredniej i w ten sposób korzystnie wpływają na polepszenie stopnia zrozumiałości mowy. Późne odbicia (czas dotarcia ponad 100ms od momentu dotarcia fali bezpośredniej) działają destrukcyjnie (docierają do uszu słuchacza za późno) i powodują zmniejszenie stopnia zrozumiałości mowy.



Rys. 6. Wczesne i późne odbicia fali akustycznej w pomieszczeniu

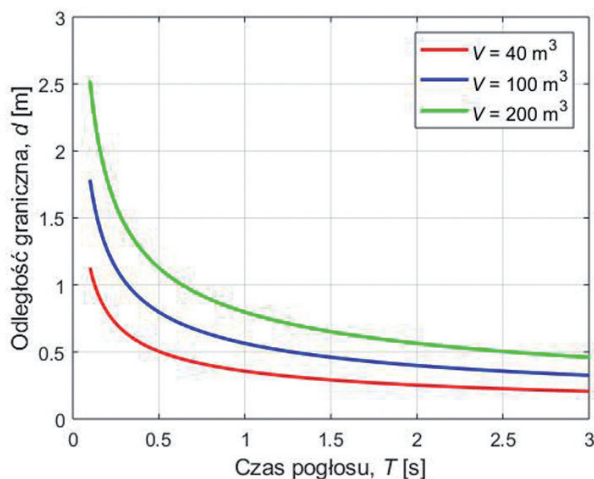
W każdym pomieszczeniu zamkniętym istnieje taka odległość, w której wpływ energii fali bezpośredniej (pole bezpośrednie) i fal odbitych (pole pogłosowe) jest taki sam. Odległość ta nazywa się odległością graniczną i można ją wyznaczyć z zależności [6]:

$$d = 0.1 \sqrt{((Q_S V)/T\pi)}, \quad (20)$$

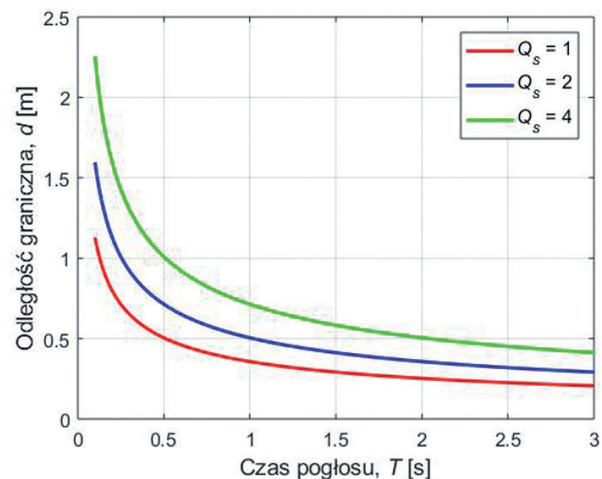
gdzie Q_S jest współczynnikiem kierunkowości źródła dźwięku, V jest objętością pomieszczenia, natomiast T – czasem pogłosu pomieszczenia. Współczynnik kierunkowości źródła dźwięku określa się jako stosunek natężenia dźwięku fali akustycznej w danym punkcie oraz dla danego źródła, do natężenia fali, jakie byłoby w tym punkcie, gdyby źródło to było wszechkierunkowe (taka sama ilość energii wypromieniowana przez źródło we wszystkich kierunkach). Dla przykładu, dla mówcy, przyjmuje się, że wartość współczynnika Q_S wynosi 1.3 – dla niskich częstotliwości, natomiast dla wysokich częstotliwości – $Q_S = 4.0$.

W celu zapewnienia dobrej zrozumiałości mowy w pomieszczeniu należy sprawić, aby źródło oraz słuchacz znaleźli się w odległości mniejszej niż odległość graniczna. Jeśli warunek ten będzie spełniony wówczas do uszu słuchacza docierać będzie fala bezpośrednia, która pozytywnie wpływa na zrozumiałość mowy, natomiast wpływ odbić będzie pomijalny.

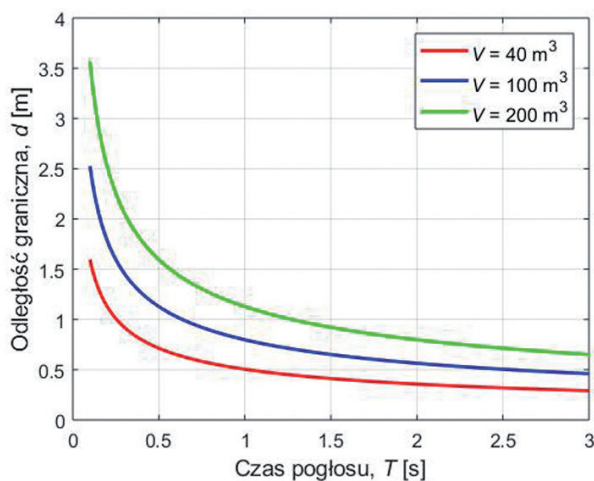
Korzystając z zależności (20) można wyznaczyć wartość odległości granicznej dla różnych wartości współczynnika kierunkowości źródła, czasu pogłosu oraz wielkości pomieszczenia (różnej objętości pomieszczenia). Na Rys. 7 oraz Rys. 8 przedstawiono zależność odległości granicznej, d , w funkcji czasu pogłosu, T , dla różnych objętości pomieszczeń, dla dwóch wartości współczynnika $Q_S = 1$ (Rys. 7) oraz $Q_S = 2$ (Rys. 8).



Rys. 7. Zależność odległości granicznej, d , w funkcji czasu pogłosu, T , dla pomieszczeń o różnej objętości, V (dla wartości współczynnika kierunkowości źródła dźwięku, $Q_s = 1$)



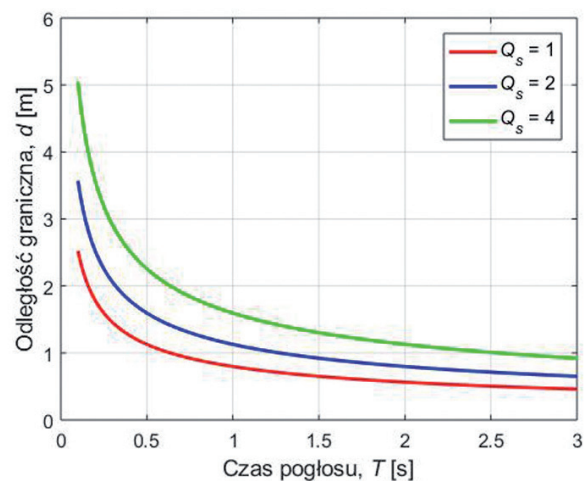
Rys. 9. Zależność odległości granicznej, d , w funkcji czasu pogłosu, T , dla różnych wartości współczynnika kierunkowości źródła dźwięku, Q_s (dla objętości pomieszczenia równej $V = 40 \text{ m}^3$)



Rys. 8. Zależność odległości granicznej, d , w funkcji czasu pogłosu, T , dla pomieszczeń o różnej objętości, V (dla wartości współczynnika kierunkowości źródła dźwięku, $Q_s = 2$)

Jak wynika z przedstawionych zależności, dla wszechkierunkowego źródła dźwięku, $Q_s = 1$ (Rys. 7) odległość graniczna w pomieszczeniu o czasie pogłosu 1s, wynosi od ok. 0.35m (dla pomieszczenia o objętości $V = 40 \text{ m}^3$) do 0.8m (dla pomieszczenia o objętości $V = 200 \text{ m}^3$). W przypadku, gdy źródło jest kierunkowe, $Q_s = 2$, wartości odległości granicznej są większe i wynoszą odpowiednio: 0.5m (dla pomieszczenia o objętości $V = 40 \text{ m}^3$) oraz 1.1m (dla pomieszczenia o objętości $V = 200 \text{ m}^3$).

Na kolejnych rysunkach (Rys. 9 oraz Rys. 10) przedstawiono zależność odległości granicznej w funkcji czasu pogłosu, dla różnych wartości współczynnika, Q_s , dla dwóch różnych objętości pomieszczeń: $V = 40 \text{ m}^3$ (Rys. 9) oraz $V = 200 \text{ m}^3$ (Rys. 10).



Rys. 10. Zależność odległości granicznej, d , w funkcji czasu pogłosu, T , dla różnych wartości współczynnika kierunkowości źródła dźwięku, Q_s (dla objętości pomieszczenia równej $V = 200 \text{ m}^3$)

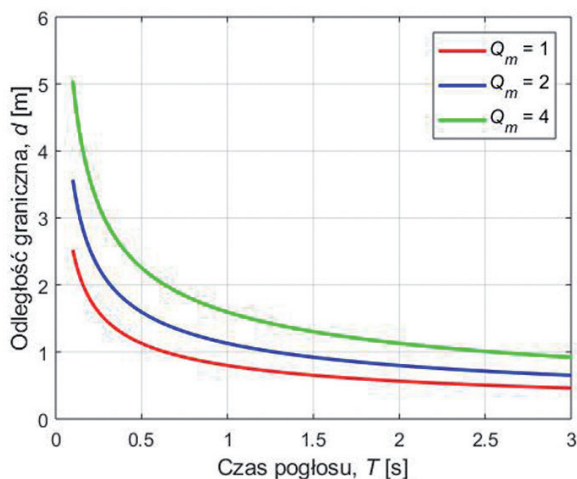
Jak widać, stosowanie coraz bardziej kierunkowego źródła dźwięku, pozwala zwiększyć znacząco odległość graniczną pomieszczenia co jest korzystne z punktu widzenia zapewnienia dobrej zrozumiałości mowy.

Należy również podkreślić, że charakterystyki kierunkowe źródeł dźwięku bardzo silnie zależą od częstotliwości. Oznacza to, że odległość graniczna pomieszczenia również zależy od częstotliwości – większe odległości graniczne występują dla wyższych częstotliwości.

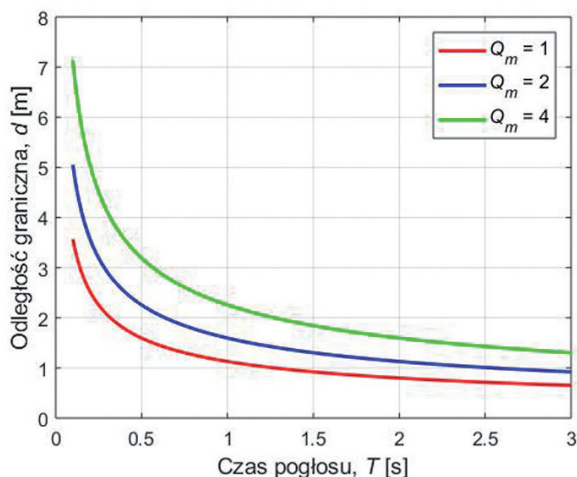
W przypadku, gdy aparat słuchowy wyposażony jest w mikrofon kierunkowy, wówczas zależność (20) należy przepisać w zmienionej formie [6]:

$$d = 0.1 \sqrt{((Q_s Q_m V) / T \pi)}, \quad (21)$$

gdzie Q_m jest współczynnikiem kierunkowości mikrofonu.



Rys. 11. Zależność odległości granicznej, d , w funkcji czasu pogłosu, T , dla różnych wartości współczynnika kierunkowości mikrofonu, Q_m (dla objętości pomieszczenia równej $V = 200 \text{ m}^3$ oraz wartości współczynnika $Q_s = 1$)



Rys. 12. Zależność odległości granicznej, d , w funkcji czasu pogłosu, T , dla różnych wartości współczynnika kierunkowości mikrofonu, Q_m (dla objętości pomieszczenia równej $V = 200 \text{ m}^3$ oraz wartości współczynnika $Q_s = 2$)

Analiza powyższych zależności pozwala stwierdzić, że zastosowanie kierunkowego źródła dźwięku oraz kierunkowego mikrofonu, zwiększa odległość graniczną pomieszczenia. Stosując oba rozwiązania jednocześnie zwiększamy obszar wokół źródła, w którym dominuje wpływ fali bezpośredniej. Efekt ten jest uzależniony od wielkości pomieszczenia, czasu pogłosu oraz wartości współczynników kierunkowych źródła i mikrofonu. Większe odległości graniczne występują dla wyższych częstotliwości.

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono podstawowe informacje nt. propagacji fali akustycznej w pomieszczeniu. Zdefiniowano podstawowe wielkości opisujące właściwości akustyczne pomieszczenia.

Szczególną uwagę zwrócono na tzw. odległość graniczną, w której wpływ pola bezpośredniego i pogłosowego jest taki sam. Podkreślono, że w celu zapewnienia dobrej zrozumiałości mowy, słuchacz powinien znajdować się w obszarze pola bezpośredniego, tj. w odległości mniejszej niż odległość graniczna. Spełnienie tego warunku oznacza, że do słuchacza docierać będzie przede wszystkim fala bezpośrednia ze źródła dźwięku, która decyduje o zrozumiałości mowy w pomieszczeniu.

W pracy pokazano, że zastosowanie kierunkowego źródła dźwięku oraz dodatkowo mikrofonu kierunkowego zwiększa znacząco odległość graniczną (w większym obszarze wokół źródła zapewniony będzie wysoki stopień zrozumiałości mowy).

7. Bibliografia

1. Śliwiński, A., and Ozimek, E., 1974. Akustyka Laboratoryjna część III. Wybrane zagadnienia i metody pomiarowe z akustyki ciała stałego oraz z akustyki pomieszczeń. PWN. Warszawa-Poznań.
2. PN-87/B-02151/02 – Akustyka Budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń budynków. Dopuszczalne poziomy dźwięku w pomieszczeniach.
3. PN-87/B-02156 – Akustyka Budowlana. Metody pomiaru poziomu dźwięku A w budynkach.
4. Sadowski, J., Akustyka architektoniczna, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.
5. Kulowski, A., 2011. Akustyka Sal. Zalecenia projektowe dla architektów. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
6. Dillon, H., Hearing aids, Boomerang Press, Sydney, 2012.