

AKUSTYKA WNETRZ (1)

ODBICIA, POCHŁANIANIE DŹWIĘKU, MODY WŁASNE POMIESZCZENIA

Właściwości akustyczne pomieszczenia odsłuchowego mają zasadniczy wpływ na brzmienie każdego zestawu hi-fi, bez względu na jego jakość i cenę. W pierwszym z cyklu artykułów o akustyce koncentrujemy się na wytłumaczeniu najważniejszych zjawisk kształtujących brzmienie pokoju odsłuchowego.



Właściciele dużych pomieszczeń, dedykowanych do odsłuchu (i kina domowego), są w najbardziej komfortowej sytuacji, ale najczęściej nie wykorzystują możliwości, jakie daje np. 40-metrowy pokój

W otwartej przestrzeni fale dźwiękowe rozchodzą się swobodnie, nie napotykając na żadne przeszkody. W takich warunkach energia dźwięku promieniowanego przez źródło o charakterystyce dookólnej (4π) maleje wraz z kwadratem odległości od niego (zależność $1/r^2$, gdzie r jest odległością od źródła dźwięku). Podwojenie odległości od źródła dźwięku powoduje spadek ciśnienia akustycznego o 6 dB. W takiej sytuacji mówimy o **polu akustycznym swobodnym**. Jeżeli jednak źródło dźwięku umieścimy w pomieszczeniu zamkniętym, wówczas emitowane przez niego fale dźwiękowe napotkają na powierzchni ograniczające i będą ulegać odbiciom. Energia fal odbitych sumuje się z energią fali bezpośredniej, która (z definicji) nie zdążyła jeszcze dotrzeć do powierzchni ograniczających pomieszczenie. Wytworzone w ten sposób pole akustyczne nazywamy **połem rozproszonym** (czasem określanym również jako pole pogłosowe lub dyfuzyjne).

Pole akustyczne swobodne właściwie nie występuje w praktyce (poza komorą bezpogłosową lub sytuacją, gdy źródło dźwięku i słuchacz są zawieszony w powietrzu, wysoko nad ziemią). Dlatego też, omawiając akustykę pomieszczeń, posługujemy się wyłącznie opisem pola rozproszonego. Bardzo dobrze byłoby, gdybyśmy potrafili przewidzieć właściwości akustyczne wne-

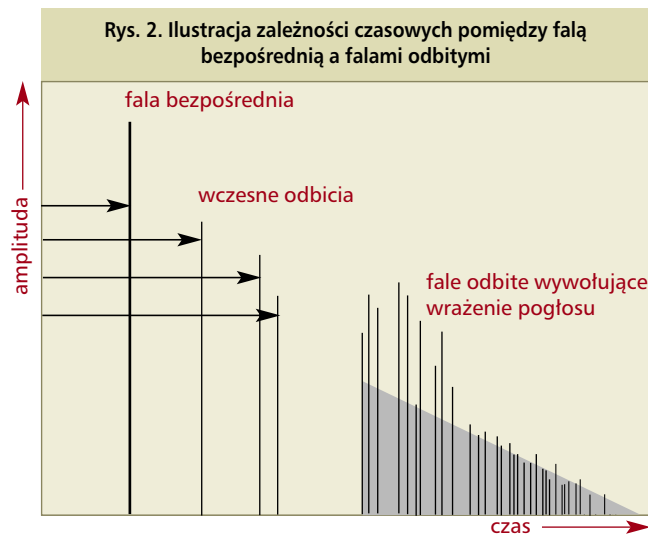
trza, dysponując jego fizycznymi parametrami (wymiary, kształt, rodzaj materiałów na ścianach, wyposażenie). Niestety nie ma jednego opisu analitycznego, który by to umożliwił, więc posługujemy się kilkoma różnymi metodami. W każdej z nich przyjmuje się pewne uproszczenia. Im bliższe są warunki rzeczywiste tym uproszczonym, tym wyniki obliczeń bliższe rzeczywistości. Jest jedno założenie wspólne dla wszystkich metod: długość fali musi być mniejsza od wymiarów wnętrza.

FALA BEZPOŚREDNIA A ODBITA

Najstarszy z modeli opisujących pole akustyczne w pomieszczeniu to **model geometryczny**. Zakłada on, że fale dźwiękowe (będące falami wzdłużnymi) zachowują się analogicznie jak promienie świetlne. Rozchodzą się więc wzdłuż linii prostych, kąt odbicia fali od płaszczyzny jest równy kątowi padania, a za przeszkodą powstaje cień akustyczny po-

nieważ fale (promienie) nie ulegają ugięciu na krawędzi przeszkody (jest to prawda tylko dla fal o długości znacznie mniejszej niż rozmiary przeszkody). Na podstawie geometrycznej akustyki wnętrz opracowano większość programów komputerowych służących do obliczeń akustyki sal. Pozwalają one m.in. obliczyć rozkład energii we wnętrzu, czas pogłosu, jak również zoptymalizować rozmieszczenie ustrojów akustycznych. Na wyniki symulacji mają wpływ nie tylko parametry wnętrza, ale też położenie i właściwości źródła dźwięku (kolumn). Pomija się natomiast zależności fazowe pomiędzy falami spotykającymi się w danym punkcie pomieszczenia. W teorii geometrycznej prawidłowe wyniki uzyskuje się głównie dla fal o długościach znacznie mniejszych od najmniejszego liniowego wymiaru pomieszczenia i znajdujących się w nim elementów. Innymi słowy, teoria ta dobrze sprawdza się dla dużych pomieszczeń i wyższych zakresów pasma akustycznego. Jednym z bardziej zaawansowanych programów symulacyjnych jest pakiet CARA (*Computer Aided Room Acoustics*), opracowany przez firmę głośnikową Elac. Dokładniej opiszemy go w następnym odcinku.

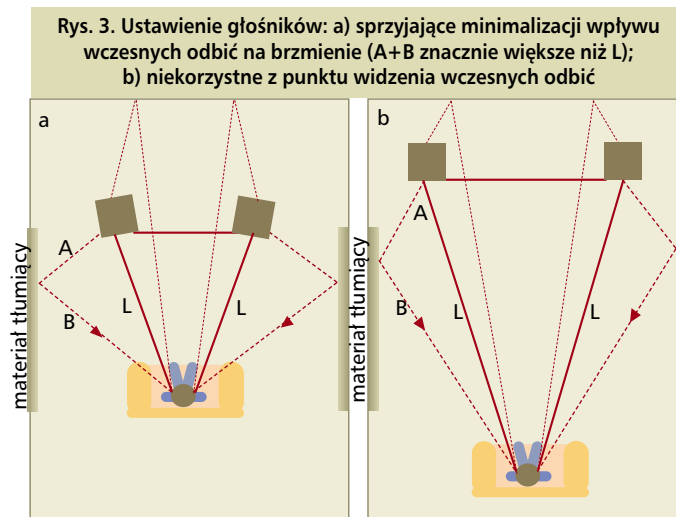
Z punktu widzenia jakości dźwięku (zarówno tego na koncercie, jak i z aparatury hi-fi), istotne jest rozróżnienie tak zwanych odbić wczesnych i późnych. Audiofile wiedzą, że te pierwsze są zdecydowanie bardziej „niebez-



pieczne” dla brzmienia systemu odsłuchowego. Jeśli odstęp czasowy pomiędzy falą docierającą do ucha bezpośrednio ze źródła (głośnika) a falą odbitą jest dostatecznie mały (mniejszy niż 10 ms), to mózg ludzki nie jest w stanie dokonać precyzyjnego rozróżnienia obydwu dźwięków. Inaczej mówiąc, są one odbierane jako pojedynczy dźwięk o zmienionej (zdeformowanej) barwie. Jeśli odstęp czasowy jest większy niż ok. 10 ms, to mózg rejestruje falę odbitą jako pogłos (więcej na ten temat piszemy w dalszej części artykułu). Omawiany efekt (zwany efektem Haasa) jest w istocie nieco bardziej skomplikowany, gdyż nie bez znaczenia jest również natężenie fali odbitej. Oczywiście im jest mniejszy w stosunku do fali bezpośredniej, tym próg słyszalności wczesnych odbić dźwięku przesuwają się w stronę wartości mniejszych niż 10 ms. Cóż omawiane zjawisko oznacza z audiofilskiego punktu widzenia? W ciągu 10 ms fala akustyczna przebywa odległość 3,4 m. Jeśli głośnik stoi w pobliżu ścian (podłogi i sufitu również), a tak przecież jest zazwyczaj, to jest prawie pewne, że do uszu słuchacza docierają wczesne odbicia. Im jest ich więcej i im są silniejsze, tym gorzej. Brzmienie muzyki staje się podbarwione (dotyczy to szczególnie średnich i wysokich tonów).

„KONTROLOWANIE” WCZESNYCH ODBIĆ

Istnieją dwie proste metody geometryczne pozwalające wyznaczyć miejsca na ścianach, suficie i podłodze, będące źródłami wczesnych odbić. Pierwsza jest dość znana. Polega na tym, że jedna osoba chodzi z lustrem dookoła miejsca odsłuchu i głośników, trzymając je równoległe do powierzchni odbijających. Położenia lustra, przy których słuchacz rejestruje w nim obraz głośników, określają miejsca wczesnych odbić fal akustycznych. Druga, bardziej zaawansowana metoda (właściwie niewymagająca drugiej osoby do pomocy) polega na wykorzystaniu długiego sznurka (dłuższego o około 5 m niż odległość kolumn od miejsca odsłuchu), na którym zawiązujemy trzy węzły. Jeden koniec sznurka mocujemy (przyklejamy) do kolumny, wiążemy węzeł przy przedniej ścianie, następnie zawiązujemy drugi w miejscu określającym odległość miejsca odsłuchu. Odmierzamy dodatkowo 3,4 m i wiążemy ostatni (trzeci) węzeł. Na czas eksperymentu węzeł 2 (podobnie jak węzeł 1) powinien zostać unieruchomiony, a cały sznurek napięty. Obydwa węzły stanowią teraz ogniska wirtualnej elipsy. Trzymając napięty sznurek za węzeł 3 wyznaczamy obszar wirtualnej elipsoidy, która przecinać się będzie ze ścianami, sufitem i podłogą. Wykonując to ćwiczenie, będziemy dosko-



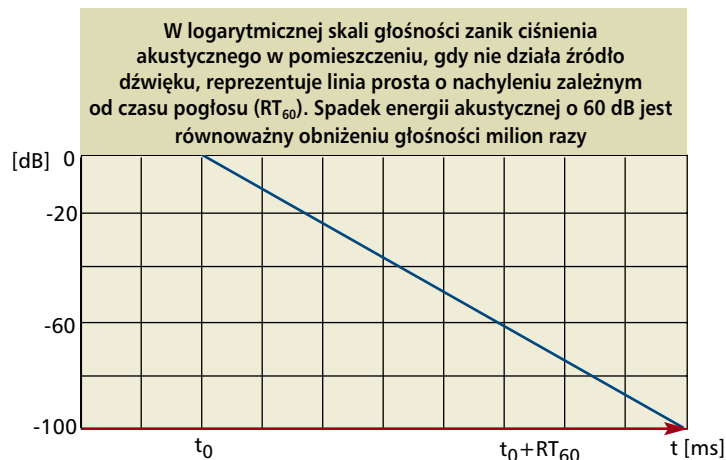
nale widzieć, które obszary (i jak jest ich dużo!) leżą w promieniu trzeciego węzła (i mniejszym). W praktyce, jedyną metodą zaradzenia wczesnym odbiciom jest zazwyczaj wyłożenie wspomnianych miejsc materiałami pochłaniającymi lub rozpraszającymi. Ponieważ zawsze istnieje ryzyko zbyt dużego przetłumienia pokoju (absorbery mogą się często znajdować również w innych miejscach pokoju), to dobrym rozwiązaniem jest choćby częściowe zastosowanie ustrojów rozpraszających, czyli przedmiotów o nieregularnej (niepłaskiej) powierzchni. Nie muszą to być ustroje specjalistyczne, czasem wystarczą wyłóczki do jajek, regały z książkami, kwiaty, boazeria, etc.

Wykonując opisane wyżej, proste ćwiczenie geometryczne, nietrudno zauważyć, że obszary wczesnych odbić na ścianach można ograniczyć poprzez odpowiednią zmianę położenia kolumn i miejsca odsłuchu. W najbardziej komfortowej sytuacji są posiadacze dużych pomieszczeń, w których odległości głośników od ścian są duże i można je niemal dowolnie zmieniać. Znacznie gorzej jest pod tym względem w małych pokojach, szczególnie o mocno wydłużonym kształcie. Jak pokazuje rysunek 2, najkorzystniejsze jest ustawienie głośników z dala od ścian bocznych i wtedy, gdy odległość głośników od słuchacza jest mała w porównaniu z długością ścian bocznych. Najbardziej zdecydowaną walkę z wczesnymi odbiciami należy natomiast podjąć w sytuacji, gdy głośniki stoją blisko długich, gładkich ścian bocznych, a miejsce odsłuchu znajduje się daleko od kolumn (kąt wyznaczony położeniem głośników i głową słuchacza jest mały), to znaczy gdy baza stereo jest wąska. O ile istnieją ku temu możliwości, należy dążyć z ustawieniem głośników i miejsca odsłuchowego ku opcji a zamiast b.

Szczególnym przypadkiem odbić dźwięku, łatwym do stwierdzenia metodą klaskania w ręce, jest echo trzepoczące (ang. *flutter echo*), powstające pomiędzy dwoma dużymi, równoległymi powierzchniami odbijającymi. Słyszy-

Orientacyjne wartości współczynnika pochłaniania dźwięku dla typowych materiałów używanych w budownictwie (w zależności od częstotliwości)

	125	250	500	1000	2000	4000
Beton malowany	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Beton surowy	0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02
Dywan na betonie	0.02	0.06	0.04	0.37	0.60	0.65
Płytki ceramiczne	0.01	0.01	0.01	0.013	0.015	0.019
Powierzchnia wody	0.008	0.008	0.013	0.015	0.020	0.025
Tynk gipsowy	0.29	0.12	0.06	0.04	0.07	0.02
Szyba zespolona	0.01	0.01	0.01	0.013	0.015	0.019
Panel ścienny ECOPHON	0.25	0.77	0.98	0.96	0.95	0.85
Linoleum	0.02	0.025	0.03	0.035	0.04	0.04



my je jako ciąg równoodległych w czasie odbić o coraz mniejszym poziomie. Efekt ten jest na szczęście dość łatwy do zniwelowania poprzez wytłumienie (częściowe lub całkowite) choćby jednej z płaszczyzn.

POCHŁANIANIE DŹWIĘKU (ABSORPCJA)

Fala akustyczna ulega nie tylko odbiciu, ale również pochłanianiu i dyfrakcji (ugięciu). Z punktu widzenia opisu właściwości akustycznych pomieszczeń zamkniętych, istotniejsze jest to pierwsze zjawisko.

Przy każdorazowym odbiciu fali dźwiękowej od ściany, sufitu, podłogi lub znajdujących się wewnątrz pokoju mebli, jej energia ulega zmniejszeniu o czynnik będący ułamkiem zawartym w przedziale liczb 0-1 (0-100%). Inaczej mówiąc, fala dźwiękowa odbita ma zawsze mniejszą (lecz niezerową) energię niż fala padająca. Ilościowo, pochłanianie dźwięku opisuje współczynnik pochłaniania α , zdefiniowany jako stosunek energii fali odbitej do energii fali padającej. W tabeli 1 podano orientacyjne współczynniki pochłaniania różnych powierzchni występujących w budownictwie oraz typowych mebli.

POGŁOS

Efektorem wielokrotnych odbić fali dźwiękowej od ścian i przedmiotów znajdujących się w pomieszczeniu jest zjawisko pogłosu. Do jego opisu ilościowego używa się teorii statystycznej, której początek dała praca Amerykani Wallac'a Clementa Sabine'a „Reverberation”, opublikowana w 1900 roku. Z analizy zjawisk akustycznych zachodzących w pomieszczeniach wynika, że reakcja pomieszczenia na zmianę ciśnienia akustycznego (gdy źródło przestaje działać) cechuje określona bezwładność. Zanik energii fal dźwiękowych (E) w funkcji czasu (t) ma charakter wykładniczy (eksponencjalny), co w uproszczeniu można zapisać jako:

$$E(t) = 10 \cdot \frac{E_0}{RT_{60}} \cdot (t-t_0)$$

przy czym RT_{60} jest czasem pogłosu, wyrażanym w sekundach.

Istnieje kilka formuł pozwalających oszacować czas pogłosu pomieszczenia. Jedną z nich jest wzór Eyringa:

$$RT_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{S \cdot \alpha}$$

gdzie: V jest objętością wnętrza [m^3]; S – powierzchnią ograniczającą wnętrze [m^2], α – średnim współczynnikiem pochłaniania ścian.

Wzór ten ma istotne ograniczenie – do przypadków, gdy średni współczynnik pochłaniania ścian nie przekracza 0,2. Jeśli na różnych powierzchniach

są materiały o różnych właściwościach pochłaniających, to wartość α jest sumą iloczynów powierzchni (S_i) i ich jednostkowych współczynników pochłaniania (α_i). Mianownik we wzorze odzwierciedla straty energii. Zazwyczaj rosną one wraz z częstotliwością, co oznacza, że dla dużych częstotliwości czas pogłosu jest mniejszy niż dla małych. Wynika stąd, że czas pogłosu jest funkcją częstotliwości f , a więc podanie jednej wartości liczbowej nie jest precyzyjną miarą akustyki wnętrza. Znacznie więcej informacji dostarcza wykres czasu pogłosu w zależności od częstotliwości, ale taki pomiar jest nieco bardziej skomplikowany niż określenie wartości średniej. Generalnie warto zdawać sobie sprawę, że krzywa pogłosu w funkcji częstotliwości powinna być możliwie równa i łagodnie opadająca (dla tonów wyższych).

Wśród wielu parametrów akustycznych czas pogłosu zajmuje uprzywilejowaną pozycję, gdyż po pierwsze – łatwo go oszacować, a po drugie – jego wartość determinuje przeznaczenie wnętrza.

WYMAGANIA AKUSTYCZNE DLA RÓŻNYCH WNĘTRZ

Z podanej zależności na czas pogłosu wynika, że jego wartość jest wprost proporcjonalna do objętości pomieszczenia i odwrotnie proporcjonalna do zdolności pochłaniających jego ścian. W małym wnętrzu nie da się uzyskać bardzo długiego czasu pogłosu i odwrotnie – w dużym kłopotliwe jest uzyskanie czasu krótkiego. Ma to odbicie w naszej subiektywnej ocenie akustyki wnętrza: w małym spodziewamy się krótkiego wybrzmiewania instrumentów, zaś w dużym – długiego. Jeśli rzeczywistość okazuje się zupełnie inna, to wówczas nasza ocena akustyki wnętrza może być negatywna. Na przykład „głuchy” kościół (o czasie pogłosu małej sali) na pewno by się nam nie spodobał.

W salach wykładowych czas pogłosu powinien być krótki (0,3-1,2 s), gdyż w tym przypadku najważniejsza jest zrozumiałość mowy. W salach muzycznych (koncertowych) czas pogłosu powinien być krótszy dla muzyki rozrywkowej (1-1,5 s), a dłuższy dla symfonicznej (1,5-2 s). Podane zakresy są orientacyjne, gdyż nawet przy takim samym przeznaczeniu wnętrza istotną rolę odgrywa – jak wspomnieliśmy – jego wielkość.

Przykładowe wartości czasu pogłosu dla wybranych, mniejszych studiów nagraniowych Polskiego Radia

STUDIO	CZAS POGŁOSU
Studio S6 (kubatura 470 m ³ , powierzchnia 86 m ²)	0,4 s
Studio S4 (kubatura 680 m ³ , powierzchnia 112 m ²)	0,5 s
Studio S4a (kubatura 110 m ³ , powierzchnia 39 m ²)	0,3 s

Czas pogłosu w studiach nagraniowych zwykle jest znacznie krótszy (łatwiejsza techniczna realizacja nagrań), ale reguły obowiązują takie same. W pomieszczeniach odsłuchowych zalecany czas pogłosu wynosi od 0,2 do 0,4 s. Jakość akustyki każdego wnętrza przeznaczonego do słuchania może być oceniana obiektywnie (metodami pomiarowymi) lub subiektywnie („na ucho”). Problem w tym, że nie ma ich jednoznacznego powiązania. Inaczej mówiąc, jeśli różne pomieszczenia mają zmierzone parametry o bliskich wartościach, to nie oznacza to, że słuchacze ocenią je jednakowo. Dlatego np. przy projektowaniu akustyki sal bierze się pod uwagę pewien zakres wartości parametrów, w którym powinny mieścić się uzyskane. Jedynym parametrem, którego obiektywną (zmierzoną) wartość ustalono jednoznacznie, jest poziom zakłóceń (hałasu), który powinien wynosić od 25 do 45 dB, mierzony jako poziom dźwięku A, w zależności od wnętrza (najmniejszy dopuszczalny hałas jest dla studiów nagraniowych).

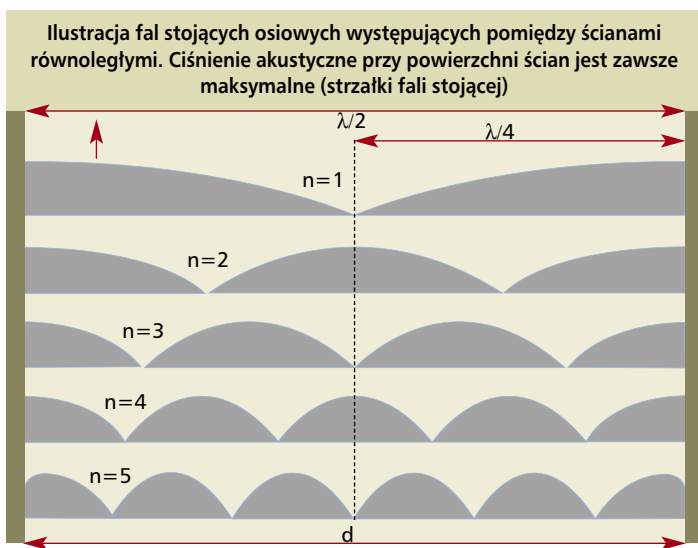
MODY WŁASNE POMIESZCZENIA

W pomieszczeniach niedużych, o objętości rzędu kilkudziesięciu m³, kłopotliwym problemem jest powstawanie fal stojących. Zjawisko to zna doskonale każdy audiofil. Zapobieganie falom stojącym jest o tyle trudne, że zależy one w głównej mierze od geometrii pomieszczenia (na co zwykle nie mamy wpływu), a ponadto są najbardziej dokuczliwe w zakresie basu, w którym skuteczność ustrojów akustycznych jest najmniejsza.

Jak już wcześniej wspomnieliśmy, geometryczny model opisu akustyki wewnątrz ma ograniczone zastosowanie, bowiem nie radzi sobie z opisem fal dźwiękowych o długościach porównywalnych lub większych niż wymiary pomieszczenia. Z pomocą przychodzi **teoria falowa**, traktująca pomieszczenie jako złożony, przestrzenny układ wielorezonansowy (modalny) o teoretycznie nieskończonej liczbie częstotliwości drgań własnych. Aby łatwiej zrozumieć istotę problemu, wyobraźmy sobie dwie nieskończenie duże, równoległe płaszczyzny. Dla pewnych długości fal akustycznych rozchodzących się prostopadle do tych płaszczyzn występuje stabilny (w czasie i przestrzeni) i nierównomierny rozkład ciśnienia akustycznego. Tworzą go fale stojące, zwane także **modami własnymi** pomieszczenia. W miejscach zwanych węzłami fali stojącej ciśnienie akustyczne jest zerowe (co w praktyce odpowiada całkowitemu wyciszeniu fali o określonej częstotliwości). W strzałkach fali stojącej jest natomiast maksymalne. Mod podstawowy należy rozumieć jako najdłuższą falę stojącą, jaka może się „pomieścić” pomiędzy dwiema płaszczyznami (ścianami). Powstaje ona dla fali akustycznej dwukrotnie dłuższej niż odległość rozważanych płaszczyzn. Na przykład w pomieszczeniu o długości 5 m mod podstawowy będzie odpowiadał fali 10-metrowej, czyli o częstotliwości 34,4 Hz (prędkość dźwięku w powietrzu w normalnych warunkach atmosferycznych wynosi 344 m/s). Dla wyznaczenia tej wartości najprościej jest posłużyć się wzorem:

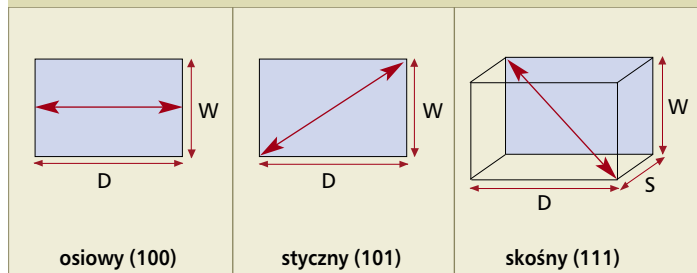
$$f_{\text{rez}} = 172 / \text{odległość ścian w metrach [Hz]}.$$

Modów własnych jest jednak nieskończenie wiele. Częstotliwość każdego kolejnego stanowi całkowitą wielokrotność wartości podstawowej. W naszym przykładzie są to częstotliwości: 68,8, 103,2, 137,6, 172 Hz, itd. Powyższy schemat obliczeń można zastosować dla wszystkich trzech wymiarów pomieszczenia prostopadłościennego: długości (D), szerokości (S) i wysokości (W), podstawiając odpowiednią wartość do mianownika wzoru.



f – długość fali akustycznej, d – odstęp między ścianami,
 n – rząd drgań własnych

Mechanizm powstawania modów własnych wszystkich trzech rodzajów



Rozumowanie to dotyczy najprostszego rodzaju modu pomieszczenia, tak zwanego **modu osiowego**. W uproszczeniu można go traktować jako falę stojącą prostopadłą do powierzchni ograniczających. Rozkład modów (często nazywanych nie do końca słusznie rezonansami) jest w rzeczywistości znacznie bardziej złożony, gdyż należy uwzględnić fale stojące powstające wzdłuż przekątnych ścian (**mody styczne**) i całej bryły pomieszczenia (**mody skośne**).

Wyznaczenie częstotliwości wszystkich modów dla pomieszczenia prostopadłościennego umożliwia bardziej złożony wzór:

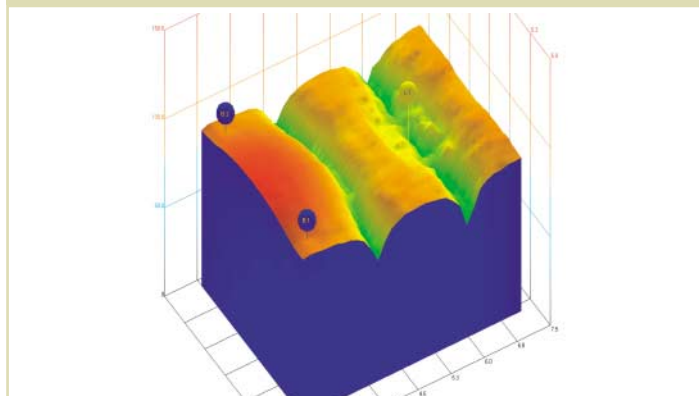
$$f(i, j, k) = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{i}{D}\right)^2 + \left(\frac{j}{S}\right)^2 + \left(\frac{k}{W}\right)^2}$$

gdzie: i, j, k – liczby całkowite dodatnie; D, S, W – wymiary liniowe wnętrza [m]; c – prędkość rozchodzenia się dźwięku (344 m/s).

Jeśli wszystkie trzy indeksy (i, j, k) są różne od zera, to wówczas obliczamy częstotliwości modów skośnych. Jeśli tylko dwa są różne od zera, to mamy do czynienia z modami stycznymi. Nietrudno zauważyć, że jeśli tylko jeden indeks jest niezerowy, np. dla modu $f(0, 1, 0)$, to powyższy wzór upraszcza się do formuły podanej wcześniej, ponieważ $c/2 = 172$ m/s.

Rozważając problem fal stojących, warto pamiętać, że pole akustyczne w pomieszczeniu jest superpozycją (nałożeniem) fal rezonansowych wszystkich wymienionych typów oraz fal promieniowanych przez źródło. Ma to

Symulacja ciśnienia fal akustycznych dla częstotliwości 74 Hz w pomieszczeniu o wymiarach: 5 m (dł.) x 4 m (szer.) x 2,6 m (wys.), w płaszczyźnie położonej 85 cm nad podłogą (typowa wysokość punktu odsłuchowego). Widać wyraźne „fałdy” ciśnienia akustycznego, odpowiadające drugiemu modowi osiowemu ($n = 2$). Wizualizacja wykonana za pomocą oprogramowania CARA



określone konsekwencje praktyczne, tj. w sytuacji, gdy w pomieszczeniu działają zestawy głośnikowe. Największą nierównomierność energetyczną pola akustycznego wywołują fale osiowe, gdyż ich energia jest największa.

ROZKŁAD MODÓW
A GEOMETRIA POMIESZCZENIA

Rozkład fal stojących (modów) w każdym pomieszczeniu jest inny, uzależniony od jego rozmiarów, proporcji, kątów pomiędzy ścianami i innych cech geometrycznych. Z tego punktu widzenia, najbardziej niekorzystne są pomieszczenia małe, prostopadłościennie, dla których długości boków stanowią własne wielokrotności. Ekstremalnym przypadkiem jest sześcian, gdyż częstotliwości modów drgań dla wszystkich wymiarów są identyczne, w efekcie czego następuje bardzo silna kumulacja energii akustycznej trzech fal osiowych. Dla pomieszczeń prostopadłościennych jest wiele proporcji wymiarów dających największą równomierność rezonansów własnych, a więc najlepszą równomierność energetyczną. Najlepsze, tak zwane złote proporcje, są następujące:

1 x 1,14 x 1,39

1 x 1,28 x 1,54

1 x 1,6 x 2,33

Oczywiście nie należy tych proporcji traktować dogmatycznie. Jeśli jednak mamy możliwość wyboru pomieszczenia, to warto wybrać to, które spełnia przynajmniej warunek R. Walkera (BBC):

$$1,1 \times (S/W) < (D/W) < 4,5 \times (S/W) - 4$$

Jeszcze lepiej jest, gdy pomieszczenie ma kształt nieregularny. Wówczas rozkład modów własnych jest korzystniejszy niż dla pomieszczeń prostopadłościennych. Nie znaczy to jednak, że zastosowanie skośnych ścian czy nierównoległego sufitu uchroni nas przed falami stojącymi. Nadal będą się one pojawiać, ale trochę słabiej zaznaczone.

Na rozkład modów własnych mają wpływ nie tylko proporcje długości ścian i kształt pomieszczenia, ale również jego ogólne gabaryty. Im jest większe, tym bardziej równomierny jest rozkład energii akustycznej w jego wnętrzu. Wynika to z faktu, że gęstość modów, czyli ich liczba w ustalonym przedziale częstotliwości, wzrasta wraz ze wzrostem powierzchni i objętości pomieszczenia. Na przykład dla pomieszczenia o długości 8,7 m podstawowym modelem osiowym jest 20 Hz i tyle wynosi odstęp pomiędzy kolejnymi modami ($n = 2, 3, 4, \dots$). W podanym wcześniej przykładzie pokoju o długości 5 m odstęp te wynoszą już 34 Hz. Duże odstępki pomiędzy modami są niekorzystne, gdyż powodują selektywne wzmacnianie bądź tłumienie określonych składowych widma dźwięku. Tak właśnie dzieje się w zakresie tonów niskich. W paśmie powyżej 200-300 Hz problem generalnie zanika, bo rezonansów jest dużo, więc energia pola akustycznego uśrednia się. W dużych salach gęstość modów drgań własnych nawet w zakresie niskich częstotliwości jest wystarczająco duża, dzięki czemu fale stojące niskotonowe nie stanowią większego problemu.

Zjawiska decydujące o akustyce pomieszczenia są na tyle złożone i wzajemnie powiązane, że brak jest jednolitego opisu analitycznego, który umożliwiłby dokładne przewidzenie właściwości akustycznych rzeczywistych sal koncertowych. Problem oceny akustyki sal dodatkowo komplikują nie do końca poznane mechanizmy percepcji dźwięków u człowieka. Nic więc dziwnego, że nie ma jednej, uniwersalnej recepty na dobrą akustykę. W praktyce, dobre pomieszczenia odsłuchowe są rzadkością. Tak naprawdę, zwykle mamy do czynienia z mniej lub bardziej złymi pomieszczeniami. W następnym odcinku napiszemy o sposobach ustawienia kolumn w pomieszczeniu.