

Marek JABŁOŃSKI¹
Piotr KLEMM²

KOMPUTEROWA ANALIZA HAŁASU W POMIESZCZENIACH PRZEMYSŁOWYCH

1. Wprowadzenie

W akustyce do opisu pola akustycznego w pomieszczeniach mogą służyć metody falowe, geometryczne i statystyczne.

Falowe modele pola bazują na rozwiązaniu równania falowego wraz z warunkami brzegowymi, opisującymi kształt i właściwości akustyczne ścian pomieszczeń. W przypadku pomieszczeń o najprostszych kształtach oraz jednolitych właściwościach każdej z powierzchni ograniczających możliwe jest rozwiązanie równania na drodze analitycznej. W przypadku pomieszczeń o złożonych kształtach rozwiązanie równania falowego wymaga użycia metod numerycznych. Najczęściej stosowana jest do tego celu metoda elementów skończonych.

Geometryczne modele opisu pola polegają na śledzeniu biegu czoła fali rozchodzącej się w pomieszczeniu. Wyróżnić można trzy klasyczne metody geometryczne, metodę promieniową, metodę obrazów pozornych oraz metodę stożków.

Statystyczna metoda opisu pola sformułowana przez C. Sabine'a w 1923 r [1] pozwala na wyprowadzenie prostych zależności algebraicznych, podających podstawowe parametry akustyczne pomieszczenia w funkcji łatwych do określenia wielkości liczbowych charakteryzujących pomieszczenie takich jak jego objętość, pole powierzchni wewnętrznej i chłonności akustycznej. Ujęcie takie nie uwzględnia indywidualnych cech pomieszczenia tj. jego kształtu i układu materiałów dźwiękochłonnych na ścianach. Zastosowanie metody statystycznej do analizy pola z uwzględnieniem indywidualnych cech pomieszczenia wymaga stosowania metod numerycznych.

2. Metody geometryczne opisu pola akustycznego

2.1. Metoda promieniowa (ang. Ray Tracing Method)

Metoda ta polega na emitowaniu przez źródło punktowe dużej liczby cząstek dźwięku w przypadkowych kierunkach równomiernie rozłożonych wokół źródła dźwięku. Cząsteczki te biegnące z prędkością dźwięku niosą zadaną porcję energii, która jest pochłaniana przez ściany podczas odbić zgodnie z pogłosowym

¹ Dr inż., Politechnika Łódzka, marojabl@ck-sg.p.lodz.pl

² Prof. dr hab. inż., Politechnika Łódzka, klemmpio@ck-sg.p.lodz.pl

współczynnikiem pochłaniania dźwięku. Cząsteczka odbita od powierzchni ściany biegnie w nowym kierunku, który jest zgodny z prawami optyki geometrycznej (prawa Snella). Rolę punktu obserwacji przejmuje jego otoczenie geometryczne mające postać przezroczystej dla dźwięku bryły lub określonej powierzchni. W odróżnieniu od obserwatora punktowego, prawdopodobieństwo dotarcia cząstki do obserwatora reprezentowanego przez bryłę lub powierzchnię jest większe od zera. Aby było ono odpowiednio wysokie minimalna liczba promieni N [2][3], powinna być zgodna z zależnością:

$$N \geq \frac{8 \cdot \pi \cdot c^2}{A} \cdot t^2 \quad (1)$$

gdzie: c - prędkość dźwięku w powietrzu,
 t - czas propagacji,
 A - powierzchnia.

Impulsowa odpowiedź pomieszczenia wraz ze wzrostem liczby emitowanych cząstek przyjmuje coraz bardziej kompletną postać. Po prześledzeniu odpowiedniej liczby promieni odpowiedź ta może być użyta do obliczeń parametrów akustycznych takich jak krzywa pogłosowa, czas pogłosu, czas wczesnego zaniku.

Stosując wyrażenie (1) można stwierdzić, że dla powierzchni 10m^2 i czasu propagacji 600ms potrzeba jest minimum 100000 promieni.

Jednym ze sposobów uwzględniania falowej natury dźwięku w modelu geometrycznym jest wprowadzenie współczynnika rozproszenia dla każdej powierzchni. Jest to sposób na przejście od zwierciadlanych do rozproszonych odbić fali.

2.2. Metoda obrazów pozornych (ang. Image Source Method)

Metoda obrazów pozornych jest oparta na zasadzie, polegającej na zastąpieniu rzeczywistego źródła dźwięku układem pozornych źródeł dźwięku odpowiednio rozmieszczonych w przestrzeni. W pomieszczeniach prostokątnych bardzo łatwo jest skonstruować wszystkie pozorne źródła dźwięku do pewnego rzędu odbicia. Szacunkowa liczba odbić dla pomieszczenia o objętości V , które dotrą do odbiornika w czasie t po emisji dźwięku jest równa:

$$N_{ref} = \frac{4 \cdot \pi \cdot c^3}{3 \cdot V} \cdot t^3 \quad (2)$$

gdzie: c - prędkość dźwięku w powietrzu,
 t - czas propagacji,
 V - objętość pomieszczenia.

Równanie (2) prawdziwe jest dla każdej geometrii pomieszczenia. Problemy pojawiają się jednak w przypadku pomieszczeń o złożonym kształcie. Przy n powierzchniach odbijających, możliwych będzie n pozornych obrazów źródła, a każde z nich może stworzyć $(n - 1)$ pozornych źródeł drugiego rzędu. Liczba możliwych pozornych źródeł dźwięku w zależności od rzędu odbicia i wyniesie:

$$N_{sou} = 1 + \frac{n}{(n-2)} \left((n-1)^i - 1 \right) \approx (n-1)^i \quad (3)$$

Gdybyśmy rozpatrzyli pomieszczenie o kubaturze 15000m^3 utworzone przez 30 powierzchni, średnia długość drogi swobodnej przebytej przez falę wyniesie około 16m co oznacza, że znalezienia odbić dla czasu propagacji 600ms potrzebny będzie rząd odbić $i = 13$. Liczba możliwych pozornych źródeł dźwięku wyniesie $N_{sou} = 29^{13} = 10^{19}$.

Ze wzoru (2) wynika, że dla rozpatrywanego pomieszczenia, dla określonej pozycji odbiornika dotrze do niego mniej niż 2500 odbić z ogólnej liczby 10^{19} .

Z tych względów model obrazów pozornych używany jest zazwyczaj do nieskomplikowanych pomieszczeń prostokątnych.

2.3. Metoda stożków (ang. Cone Method)

Metoda stożków, będąca odmianą geometrycznego modelu pola, zbliżoną do metody promieniowej. Półproste będące w metodzie promieniowej torami cząsteczek wysyłanych ze źródła, są w metodzie stożków interpretowane jako wiązki energii. Każda z wiązek obejmuje jednakowy kąt bryłowy, w którym biegnie wycinek fali kulistej, odbijający się następnie od ścian zgodnie z prawami akustyki geometrycznej. Suma tych kątów równa jest pełnemu kątowi bryłowemu.

2.4. Metody hybrydowe

Słabości metod klasycznych doprowadziły do rozwoju modeli hybrydowych, które wykorzystują najlepsze cechy poszczególnych metod klasycznych.

Metoda wykorzystująca tzw. "test widoczności", pozwala wyeliminować przypadki występowania w reflektogramie prążków reprezentujących te same sekwencje odbić fal dźwiękowych od ścian. Położenie poszczególnych prążków reflektogramu na osi czasu oraz ich amplitudę wyznacza się przez obliczenie czasu dojścia impulsu od odpowiednich źródeł pozornych do punktu obserwacji, z uwzględnieniem wpływu przebytej drogi, pochłaniania dźwięku podczas kolejnych odbić i absorpcji dźwięku. Skończona liczba użytych promieni powoduje zmniejszenie dokładności reflektogramu. Aby przy danej liczbie promieni uzyskać efektywną metodę obliczeniową w algorytmie obliczeń stosuje się metodę "źródeł wtórnych". W metodzie tej, dla odbić wyższego rzędu, promień docierający do powierzchni, odbija się od niej, a w punkcie odbicia wytwarzane jest źródło wtórne. Źródło wtórne posiada pewną energię stosowną do współczynników pochłaniania dźwięku powierzchni odbijających, przebytej drogi oraz może mieć pewne opóźnienie w stosunku do źródła pierwotnego [4].

Inna metoda polega na modyfikacji metody promieniowej w ten sposób, że punkt obserwacji zastępuje się jego kulistym otoczeniem o średnicy rosnącej wraz z upływem czasu. Korpuskuły wysyłane w kierunkach losowych, równomiernie rozłożonych wokół źródła są przyczyną powstania statystycznego rozrzutu wyniku, malejącego wraz z liczbą prześlędzonych korpuskuł. Powyższa modyfikacja pozwala w istotny sposób zmniejszyć rozrzut wyniku oraz ograniczyć liczbę prześlędzonych korpuskuł, a tym samym skrócić czas obliczeń. [5]

3. Źródła dźwięku

3.1. Źródła punktowe

Punktowe źródło dźwięku jest reprezentowane przez punkt wysyłający korpuskuły w kierunkach równomiernie rozłożonych w pełnym kącie bryłowym wokół źródła. Energia mierzona przez każdą z korpuskuł jest jednakowe, zaś suma tych energii jest równa energii fali kulistej wysłanej przez źródło. W przypadku gdy wymiar liniowy źródła (wysokość, długość, szerokość) jest większy od połowy odległości między źródłem a najbliższym punktem obserwacji, źródło dźwięku należy traktować jako powierzchniowe.

3.2. Źródła powierzchniowe

Dla dużych źródeł dźwięku o złożonych geometrycznie kształtach (duże zespoły wentylatorów, chłodnie wentylatorowe, zespoły wentylator-cyklon) źródło przestrzenne jest zbiorem powierzchniowych źródeł dźwięku o określonym poziomie mocy akustycznej. Zamyka się bryłą o kształcie prostopadłościanu o wymiarach najbardziej zbliżonych do wymiarów źródła, każdy bok bryły jest źródłem powierzchniowym o określonym poziomie mocy akustycznej.

4. Obliczenia

4.1. Geometria pomieszczenia i materiały

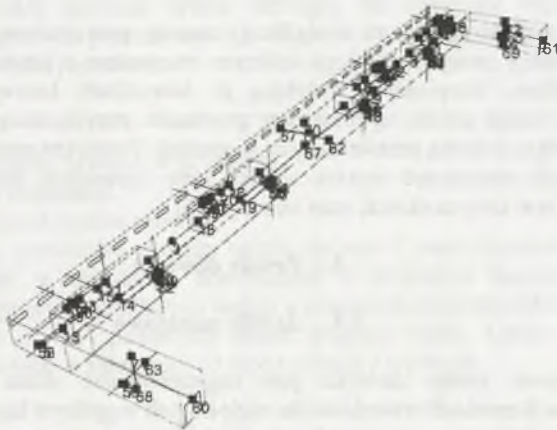
Pomieszczenie wentylatorów o prostokątnym kształcie rzutu o wymiarach wewnętrznych około 98,5m x 8,0m i przekroju o zmiennej wysokości, wynikającym z kształtu przekrycia. Kubatura wewnętrzna pomieszczenia około 3336 m³, całkowita powierzchnia około 3443 m². Pomieszczenie wentylatorów zamodelowane zostało przez 97 powierzchni z których 45 było powierzchniami brzegowymi (rys.1).

Przyjęto, że poszczególne powierzchnie są wykonane z następujących materiałów: podłoga - sztuczny kamień, ściany - tynk cementowo-wapienny, sufit stropodachu - materiał dźwiękochłonny, drzwi - drewniane, okna - podwójnie szklone.

Czasu pogłosu policzony dla poszczególnych częstotliwości w pasmach oktaowych kształtował się w następujący sposób:

Tablica 1. Czas pogłosu.

Częstotliwość [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Czas pogłosu [s]	2,03	2,02	1,32	1,09	1,06	1,08	1,05	0,72



Rys.1. Obliczeniowy model wentylatorni zawierający cztery wentylatory oraz lokalizacja źródeł dźwięku oraz punktów pomiarowych.

4.2. Źródła dźwięku i odbiorniki

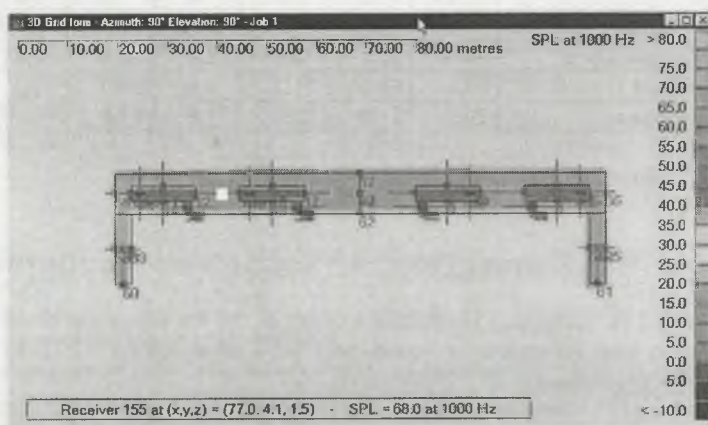
Źródła dźwięku zamodelowano na trzy sposoby:

- źródła powierzchniowe będące bezpośrednio źródłami hałasu (wszystkie powierzchnie wentylatorów, rurociągi dolotowe i wylotowe) oraz źródła powierzchniowe będące wtórnymi źródłami hałasu (ściany, dach, okna),
- źródła powierzchniowe będące bezpośrednio źródłami hałasu (wszystkie powierzchnie wentylatorów), źródła punktowe (rurociągi dolotowe i wylotowe) oraz powierzchnie będące wtórnymi źródłami hałasu (ściany, dach, okna),
- źródła punktowe (wszystkie wentylatory, rurociągi dolotowe i wylotowe) oraz źródła powierzchniowe będące wtórnymi źródłami hałasu (ściany, dach, okna).

Siedem punktów odbioru rozmieszczono w przejściach wzdłuż wentylatorów.

4.3. Wyniki symulacji

Obliczenia wykonano dla trzech wariantów zamodelowania źródeł dźwięku. Obliczenia wykonano dla liczby promieni równej 5508, temperatury 20°C, wilgotności względnej 50%. Przyjęto moduł siatki przestrzennej 1,5m x 1,5m. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rys.2.

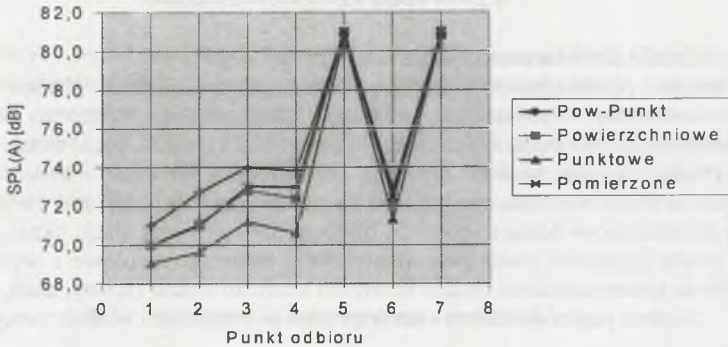


Rys.2. Poziom ciśnienia akustycznego SPL [dB(A)] dla częstotliwości 1000Hz w przypadku źródeł powierzchniowych.

Poziom ciśnienia akustycznego policzony dla poszczególnych punktów odbioru porównano z wartościami pomierzonymi poziomy ciśnienia akustycznego. Na rysunku 3 i w tablicy 2 przedstawiono wynik tych porównań.

5. Wnioski

Przedstawiona komputerowa analiza pola akustycznego w pomieszczeniu, oparta na zmodyfikowanej metodzie promieniowej pozwala modelować duże źródła dźwięku o złożonych geometrycznie kształtach pracujące w pomieszczeniach przemysłowych oraz przewidywać poziom dźwięku z odchyleniem rzędu 1,5 dB. Niższe wartości obliczone w stosunku do pomierzonych wskazują, że wartości absorpcji użyte w analizie są zbyt wysokie. Metoda ta pozwala także znacznie ograniczyć liczbę prześlędzonych promieni, co wydawnie obniża czas obliczeń.



Rys.3. Porównanie poziomu ciśnienia akustycznego SPL [dB(A)] policzonego i pomierzonego dla poszczególnych punktów odbioru.

Tablica 2. Poziom ciśnienia akustycznego w punktach odbioru.

Rodzaj źródła	Numer odbioru						
	1	2	3	4	5	6	7
Pow-punkt.	71,0	72,7	74,0	73,8	81,0	72,9	80,9
Powierzchniowe	70,0	71,1	72,8	72,4	80,9	72,2	80,9
Punktowe	69,1	69,6	71,2	70,6	80,7	71,3	80,8
Pomierzone	70,0	71,0	73,0	73,0	81,0	72,5	81,0

Literatura

- [1] Sabine W.C.: Collected Papers on Mcoustics. Cambridge: Harvard University Press, 1922.
- [2] Rindel J.H.: Computer simulation techniques for the acoustical design of rooms - how to treat reflections in sound field simulation. ASVA 97, Tokyo, 2-4 April 1997. Proceedings p. 201-208.
- [3] Rindel J.H.: Computer Simulation Techniques for Acoustical Design of Rooms. Acoustics Australia 1995, Vol. 23 p. 81-86.
- [4] Lyngé C.: Odeon Room Acoustics Program, Version 3.1, User Manual, Industrial, Auditorium and Combined Editions, Department of Acoustic Technology, Technical University of Denmark, Lyngby, 1998.
- [5] Kulowski A.: Modyfikacja promieniowej metody modelowania pola akustycznego w pomieszczeniach. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektronika, Nr LXXIV, 1991.

COMPUTER ANALYSIS OF NOISE FOR INDUSTRIAL ROOMS

Summary

This paper presents an extension to the traditional room acoustic modelling methods allowing computer modelling of huge machinery in industrial spaces. The program allows the modelling of point sources, surface sources and line sources. Combining these three types it is possible to model huge machinery.