

## ANALIZA WŁASNOŚCI AKUSTYCZNYCH POMIESZCZENIA W ZALEŻNOŚCI OD KSZTAŁTU SUFITU

Marek JABŁOŃSKI\*

\* Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: Marek.Jablonski@p.lodz.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono porównanie własności akustycznych pomieszczenia dla różnego rodzaju konstrukcji sufitu. Wykorzystano parametry związane ze stosunkiem energii (C80), przestrzenne (LF), określające zrozumiałość mowy (STI) oraz spadek energii w przestrzeni (DL2).

**Słowa kluczowe:** parametry akustyczne, ocena akustyczna pomieszczeń, komputerowy model pola akustycznego.

### 1. WSTĘP

Pod względem wymagań akustycznych pomieszczenia można podzielić na wnętrza o akustyce niekwalifikowanej i kwalifikowanej.

Pierwsza grupa obejmuje pomieszczenia o funkcji, dla której akustyka jest jedynie elementem ogólnie rozumianego komfortu użytkowania. W drugiej grupie mieszczą się pomieszczenia, których funkcja jest w dużym stopniu związana z ich akustyką.

W przypadku pomieszczeń o akustyce niekwalifikowanej projektowanie akustyczne polega głównie na niedopuszczeniu do wystąpienia niekorzystnych zjawisk akustycznych obniżających komfort użytkowania tych pomieszczeń, a czasem wręcz utrudniających korzystanie z nich w sposób zgodny z ich funkcją.

W przypadku pomieszczeń o akustyce kwalifikowanej projektowanie akustyczne obejmuje również, poza eliminowaniem ww. defektów, kształtowanie własności akustycznych ściśle związanych z funkcją pomieszczenia, których akustyka ma istotne znaczenie dla ich funkcji. Istotnym elementem tej funkcji jest słuchanie lub rejestracja dźwięku, z reguły niosącym treść artystyczną lub dydaktyczną, często z udziałem większej liczby osób [1]. Do takich pomieszczeń tradycyjnie zalicza się sale koncertowe, teatralne i wykładowe, studia nagrań itp. Generalnie dźwięk powinien

docierać do każdego słuchacza w czystej i wyraźnej postaci w ten sposób, by wszyscy zebrani mogli odbierać zdarzenie akustyczne w całej okazałości.

### 2. KRYTERIA OCENY WŁAŚCIWOŚCI AKUSTYCZNYCH 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.).

Kształt pomieszczenia ma bezpośredni wpływ na charakterystykę dźwięku. Kształt oraz geometria ścian, stropów i podłogi pomaga regulować akustykę pomieszczeń. Kąty, łuki i sklepienia mogą kierować i skupiać dźwięki w obrębie zamkniętej przestrzeni. Kształty te nie powinny spełniać jedynie estetycznych wymogów architektury, lecz być swego rodzaju konsensusem architektoniczno-akustycznym. Okrągłe pomieszczenia mają tendencję do skupiania dźwięków w pojedynczych miejscach, kwadratowe natomiast – z równoległymi ścianami – są źródłem powstawania niebezpiecznych fal stojących będących skutkiem oddziaływania na siebie fal o podobnych długościach.

Pojęcie jakości akustycznej ma naturę subiektywną, ma jednak wyraźny związek z parametrami akustycznymi pomieszczenia. W odniesieniu do sal koncertowych i operowych, związek ten został określony przez Leo L. Berenka [3] oraz Yoichi Ando [2]. Zdefiniowali oni zbiory parametrów odpowiedzialnych za poszczególne czynniki oceny subiektywnej, a następnie określili wkład poszczególnych parametrów w wypadkową ocenę jakości.

Na jakość brzmienia muzyki oraz zrozumiałość mowy wpływa w decydujący sposób wartość oraz charakterystyka częstotliwościowa czasu pogłosu. Aby zapewnić zrozumia-

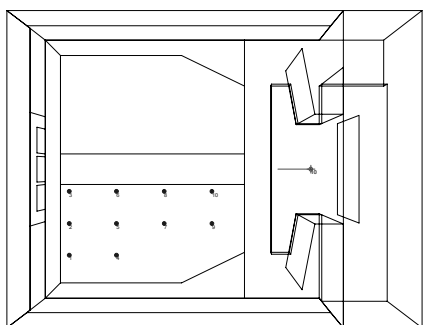
łość słowa mówionego należy zadbać o krótki czas pogłosu, muzyka wymaga znacznie dłuższego czasu pogłosu. Wskaźnik wyrazistości odpowiada wrażeniu przejrzystości muzyki. Duże wartości prowadzą do lepszej zrozumiałości mowy przy konieczności jednoczesnego zachowania odpowiednich wartości dla określonego rodzaju muzyki. Współczynnik zrozumiałości mowy daje bezpośrednią informację o zrozumiałości mowy w audytoriach. Ocenia się ją przy użyciu metody STI [4]. Przestrzenność rozumiana jest jako obraz wnętrza wytworzony w świadomości słuchacza pod wpływem przestrzennego układu docierających do niego fal odbitych. Jest to ważny element oceny jakości pomieszczenia, zależny od kierunków dochodzenia fali bezpośredniej i fali odbitych, ich energii oraz stopnia rozproszenia pola akustycznego w pomieszczeniu. Przestrzenność jest charakteryzowana przez wskaźnik proporcji między energią wcześniej docierającą do miejsca odsłuchu z kierunków bocznych oraz energią docierającą w tym samym czasie, ale bezpośrednio ze źródła [6].

### 3. CHARAKTERYSTYKA POMIESZCZENIA

Analizowane pomieszczenie ma kształt prostopadłościenny o wymiarach wewnętrznych ok. 22.1m x 16.8m i wysokości około 7.6m. Kubatura wewnętrzna pomieszczenia wynosi około 2800m<sup>3</sup>. Liczba miejsc około 200.

### 4. SYMULACJA KOMPUTEROWA

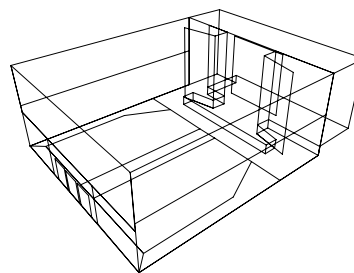
W obliczeniach wykorzystano komputerowy model pola akustycznego, oparty na zmodyfikowanej metodzie promieniowej, przy użyciu którego obliczono parametry opisujące charakter akustyki pomieszczenia [5]. Pomieszczenie zostało zamodelowane jako trójwymiarowa bryła przez zmienną liczbę powierzchni zależną od konstrukcji sufitu. Źródło dźwięku zlokalizowano na scenie i przyjęto wartości jak dla głośno mówiącej osoby. Punkty odbioru usytuowano w miejscach przewidzianych na widowni. Z uwagi na symetryczny kształt pomieszczenia punkty odbioru zlokalizowano tylko po jednej stronie widowni (Rys.1).



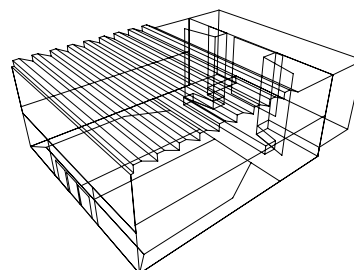
Rys. 1. Usytuowanie źródła i odbiorów.  
Fig. 1. Location of the source and receivers.

Model obliczeniowy dla poszczególnych rozwiązań sufitu przedstawiono na Rys.2. Poszczególne warianty różniły się kształtem sufitu. Wariant pierwszy posiadał sufit płaski, wszystkie inne warianty miały sufit o zmiennym kształcie. Były to wyspy sufitowe umieszczone pionowo lub poziomo, sufit skośny oraz sufit przypominający kształtem fałę. Żeby można było porównać poszczególne przypadki obliczeniowe materiały sufitu i jego elementów przyjęto tak, aby równoważna powierzchnia dźwiękochłonna wyrażona w m<sup>2</sup> w każdym z analizowanych przypadków była jednaka.

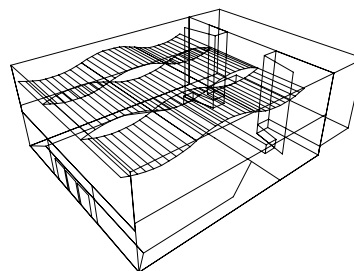
Po wprowadzeniu kształtu sali i współczynników pochłaniania dźwięku przez materiały wykończeniowe, program symulacyjny obliczył odpowiedź pomieszczenia na pobudzenie impulsowe, a na tej podstawie parametry akustyczne sali.



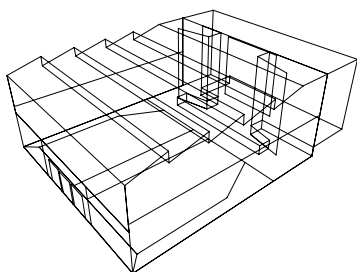
a) wariant I



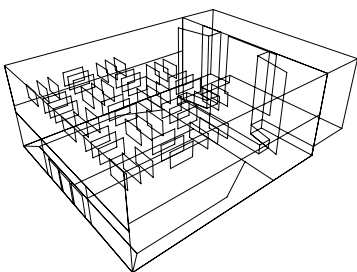
b) wariant II



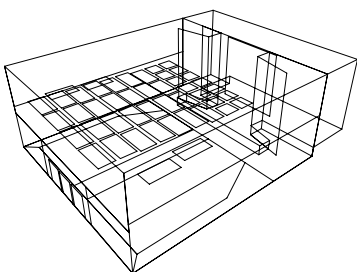
c) wariant III



d) wariant IV



e) wariant V



e) wariant VI

Rys. 2. Obliczeniowy model pomieszczenia dla różnego typu konstrukcji sufitu.

Fig. 2. Computational model of the premises for different types of ceiling construction.

Ocenę wpływu kształtu sufitu na jakość akustyczną pomieszczenia dokonano na podstawie parametrów czasowych i energetycznych opartych na odpowiedzi impulsowej [7]. Parametrami tymi były parametry związane ze stosunkiem energii ( $C_{80}$  - wyrazistość), przestrzennością (LF – miara wczesnej energii bocznej). Przy ocenie akustycznej pomieszczeń duże znaczenie ma również problem zrozumiałości mowy. W obliczeniach kierowano się znormalizowaną metodą STI (Speech Transmission Index) określającą zrozumiałość mowy poprzez zidentyfikowanie i ocenę wpływu pomieszczenia tzn. warunków panujących w nim, na sygnał dźwiękowy odbierany przez słuchaczy. Analizo-

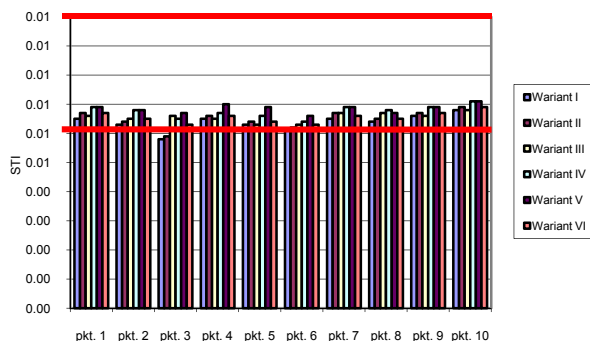
wano również parametr który określa spadek poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości (DL2) [8].

Tabela 1. Zalecane wartości parametrów akustycznych  
Table 1. Recommended values of the acoustic parameters

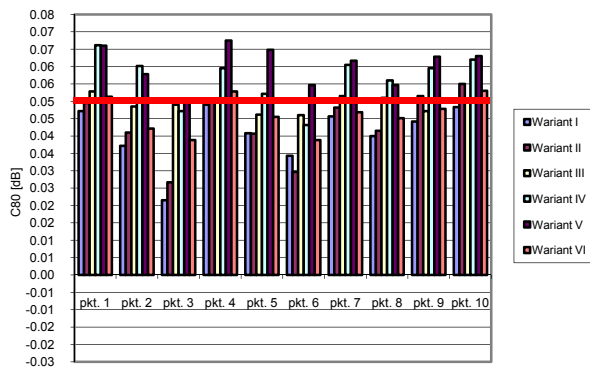
Parametr	Wartości zalecane oraz ocena subiektywna			
	excellent	good	fair	poor
$C_{80}$ [dB]	$C > 11$	$C > 5$	$-2 < C < 5$	$C < -2$
STI [-]	$> 0,85$	$0,75 - 0,85$	$0,55 - 0,75$	$0,35 - 0,55$
LF [-]	$0,2 - 0,25$	$0,1 < LF < 0,2$		$LF < 0,1$
DL2 [dB]	3 - 5		3	1 - 3

## 5. WYNIKI ANALIZ

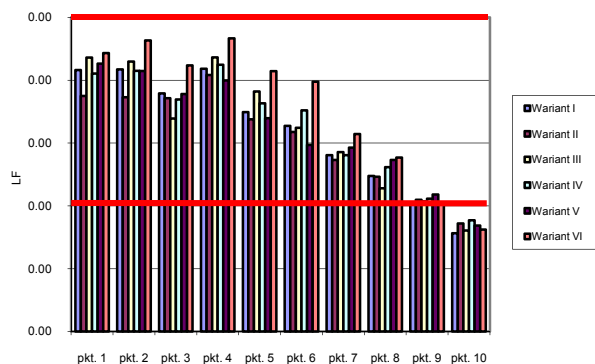
Wartości parametrów akustycznych uzyskane z analizy numerycznej dla geometrii jak na Rys.2, dla wszystkich konstrukcji sufitu, przedstawiono na Rys.3 - 5. Zamieszczono wartości współczynnika zrozumiałości mowy STI, wyrazistości  $C_{80}$ , przestrzenność LF oraz spadek poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości DL2. Parametr  $C_{80}$  i LF przedstawiono jako wartości średnie dla poszczególnych punktów odbioru w zakresie częstotliwości 125–4000Hz. Wartości zalecane (zakresy) zaznaczono na wykresach grubszymi liniami.



Rys. 3. Wartości STI dla różnych konstrukcji sufitu.  
Fig. 3. STI values for different types of ceiling construction.



Rys. 4. Średnie wartości  $C_{80}$  dla różnych konstrukcji sufitu.  
Fig. 4.  $C_{80}$  values for different types of ceiling construction.



Rys. 5. Średnie wartości LF dla różnych konstrukcji sufitu.  
Fig. 5. LF values for different types of ceiling construction.

Tabela 2. Wartości DL2 dla poszczególnych wariantów.  
Table 2. DL2 values for different variants.

DL2 [dB]					
War. I	War. II	War. III	War. IV	War. V	War. VI
2,83	3,96	3,51	3,48	3,36	3,11

## 6. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Kształt sufitu odgrywa ważną rolę w kształtowaniu akustyki wnętrza. W pracy przeanalizowano sześć różnych typów konstrukcji sufitu.

Wyniki analizy wykazały, że:

- względnie najgorsze parametry akustyczne uzyskano dla płaskiego sufitu (typ konstrukcji I),
- w większości przypadków najkorzystniejsze wartości parametrów uzyskano dla pomieszczenia z konstrukcją sufitu IV i V (silne rozróżnienie powierzchni),
- konstrukcja sufitu III i VI w pewnych punktach odbioru posiada korzystniejsze wartości parametrów niż pozostałe typy konstrukcji (Rys.4), jednak zakrzywione sufity w kształcie kopuł stwarzają duże problemy z dźwiękiem. Wypukłe płaszczyzny mogą powodować skupienie fali dźwiękowej w określonych miejscach, podczas gdy sufit wklęsły naturalnie rozprasza nadmiarową energię dźwiękową,
- parametr określający przestrzenność dźwięku najsilniej zależy od kształtu sufitu oraz od położenia punktu odbioru,
- współczynnik zrozumiałości mowy dla wszystkich punktów odbioru i wszystkich wariantów jest zbliżony co wskazuje na to, że w mniejszym stopniu zależy on od kształtu pomieszczenia a w większym od warunków pogłosowych,
- spadek poziomu ciśnienia akustycznego wraz z podwojeniem odległości tylko w przypadku sufitu płaskiego wykazuje wartości mniejsze od optymalnych.

## 7. WNIOSKI

Dobre warunki akustyczne wymagają równomiernego rozkładu energii akustycznej w pomieszczeniu, odpowiednich wartości czasu pogłosu, równomiernego zaniku dźwięku (m.in. niewystępowanie echa) oraz odizolowania zakłóceń akustycznych z zewnątrz. Warunki te uzyskuje się przez nadanie odpowiedniego kształtu pomieszczeniu, odpowiednie rozmieszczenie powierzchni dźwiękochłonnych i odbijających oraz zastosowanie ciężkich lub wielowarstwowych przegród budowlanych.

Wrażenie przestrzenności dźwięku, czyli otoczenia dźwiękiem zapewnia wprowadzenie w pomieszczeniu nieregularności. To mogą być dekoracje, rzeźby i inne elementy zapewniające rozproszenie energii. Dotyczy to szczególnie powierzchni bocznych, lecz i powierzchnia sufitu może stanowić element rozpraszający.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że najlepsze wartości parametrów akustycznych otrzymuje się przy zastosowaniu konstrukcji sufitu V (pionowe wyspy akustyczne), która daje odpowiednie rozproszenie dźwięku, oraz zapewnia odpowiednie pochłanianie.

## ANALYSIS OF ACOUSTIC PROPERTIES OF ROOM DEPENDING ON THE SHAPE OF CEILING

**Summary:** This paper presents a comparison of acoustic properties of room for different types of ceiling construction. We used parameters related to energy ratio (C80), spatial (LF), indicating the speech intelligibility (STI) and a spatial decay (DL2).

### Literatura

- [1] Kulowski A.: *Modyfikacja promieniowej metody modelowania pola akustycznego w pomieszczeniach*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Seria Elektronika nr 74, Gdańsk 1991
- [2] Ando Y.: *Concert hall acoustics*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 1985.
- [3] Berenek L.L.: *Music, acoustics and architectures*. J. Wiley and Sons, New York, 1962.
- [4] Bradley J.S.: *Predictors of speech intelligibility in rooms*. JASA 80(3), 1986, str. 837-845
- [5] ODEON Room Acoustics Program. Version 5.0. User Manual. Industrial, Auditorium and Combined Editions. 2001
- [6] Sadowski J.: *Akustyka architektoniczna*. PWN, Warszawa, 1976, str. 111-122, 208-228.
- [7] PN-EN ISO 3382:2001 – Pomiar czasu pogłosu pomieszczenia w powiązaniu z innymi parametrami akustycznymi.
- [8] PN-EN ISO 11690-1 – Zalecany sposób postępowania przy projektowaniu miejsc pracy o ograniczonym hałasie, wyposażonych w maszyny