



SONITUS

akustyka wnętrz • ochrona przeciwdźwiękowa

Sonitus Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Sp. k.
ul. Strachocińska 124
51-511 Wrocław
NIP: 8952076658

tel. 71 718 34 34
fax 71 718 37 34
sonitus@sonitus.pl
www.sonitus.pl

ZLECENIODAWCA: Liceum Ogólnokształcące w Ząbkowicach Śląskich
ul. Powstańców Warszawy 8c
57-200 Ząbkowice Śląskie

OBIEKT: Aula Liceum Ogólnokształcącego w Ząbkowicach Śląskich przy ul. Powstańców Warszawy 8c

TEMAT: Wytyczne adaptacji akustycznej i projekt systemu nagłośnienia auli Liceum Ogólnokształcącego w Ząbkowicach Śląskich przy ul. Powstańców Warszawy 8c

OPRACOWAŁ: mgr inż. Marcin Biegaj

Wrocław, listopad 2016 r.

Spis treści

1	Cel i zakres opracowania	3
2	Podstawa opracowania	3
3	Akustyka wewnątrz	4
3.1	Sprawozdanie z pomiarów czasu pogłosu	4
3.1.1	Data i miejsce wykonania pomiarów	4
3.1.2	Metodyka pomiarów	4
3.1.3	Zastosowana aparatura pomiarowa	4
3.1.4	Objętość pomieszczenia	4
3.1.5	Opis pomieszczenia z uwzględnieniem elementów wpływających na akustykę wnętrza	4
3.1.6	Szkicowy plan pomieszczenia	5
3.1.7	Metoda wykonania pomiarów	5
3.1.8	Wyniki pomiarów czasu pogłosu	5
3.2	Wymagania czasu pogłosu i wskaźnika zrozumiałości mowy	7
3.3	Ocena jakości akustycznej sali w stanie obecnym	9
3.4	Model komputerowy	9
3.5	Wytyczne adaptacji akustycznej	10
3.6	Wyniki obliczeń parametrów akustycznych	14
3.6.1	Analiza czasu pogłosu T_{20}	14
3.6.2	Analiza parametru zrozumiałości mowy RASTI	15
3.7	Wnioski	16
4	Zalecenia	16
5	system nagłośnienia	17
5.1	Przedmiot opracowania	17
5.2	Opis funkcjonalny	17
5.3	Opis techniczny	17
5.4	Model komputerowy – rozmieszczenie przenośnych urządzeń głośnikowych	23



1 CEL I ZAKRES OPRACOWANIA

Celem opracowania jest przedstawienie rozwiązań technicznych mających na celu zapewnienie prawidłowych warunków akustycznych istniejącej auli znajdującej się w Liceum Ogólnokształcącym w Ząbkowicach Śląskich przy ul. Powstańców Warszawy 8c.

Zakres pracy:

- a) akustyka wnętrz:
 - sprawozdanie z pomiarów czasu pogłosu pomieszczenia dla stanu istniejącego,
 - wykonanie przestrzennego modelu pomieszczenia w programie służącym do modelowania akustyki wnętrz na podstawie rysunków dostarczonych przez zleceniodawcę oraz dokumentacji zdjęciowej,
 - określenie wymagań akustycznych dla sali w odniesieniu do jej funkcji,
 - opracowanie wytycznych adaptacji akustycznej sali, dobór i lokalizacja materiałów,
 - obliczenia parametrów akustycznych sali: T_{20} i RASTI po uwzględnieniu proponowanych rozwiązań.
- b) nagłośnienie:

2 PODSTAWA OPRACOWANIA

- [1] Rysunki rzutów i przekrojów sali,
- [2] Dokumentacja zdjęciowa,
- [3] Norma PN-EN ISO 3382-2:2010 Akustyka - Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń - Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach,
- [4] Norma PN-EN ISO 3382-1:2009 Akustyka - Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń - Część 1: Pomieszczenia specjalne,
- [5] PN-B-02151-4: 2015 Akustyka budowlana - Ochrona przed hałasem w budynkach - Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach,
- [6] Ustawa z dnia 07.07.1994 r. Prawo budowlane [tekst jednolity Dz.U. 2016 poz. 290],
- [7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (tekst jednolity Dz.U. 2015 poz. 1422.).



3 AKUSTYKA WNĘTRZ

3.1 Sprawozdanie z pomiarów czasu pogłosu

3.1.1 Data i miejsce wykonania pomiarów

Pomiary czasu pogłosu w auli Liceum Ogólnokształcącego w Ząbkowicach Śląskich przy ul. Powstańców Warszawy 8c wykonano w dniu 13.04.2016 r. w godzinach 11.30 - 13.30.

3.1.2 Metodyka pomiarów

Pomiary czasu pogłosu pomieszczenia zrealizowano w oparciu o normę PN-EN ISO 3382-2:2010 [3].

3.1.3 Zastosowana aparatura pomiarowa

- a) miernik poziomu dźwięku/analizator widma 1 klasy dokładności Soundbook MK2_4L E nr seryjny #07229 z zainstalowanym oprogramowaniem SAMURAI wersja 2.6.2, przedwzmacniaczem typ SV01A, nr 5418 i mikrofonem 40AE nr 41244, posiadający świadectwa wzorcowania nr 212/02/2015 oraz nr 213/04/2014 z dnia 27 kwietnia 2015 r.
- b) kalibrator akustyczny 1 klasy dokładności Sonopan KA-50 (nr fabr. 154/06), posiadający świadectwo wzorcowania nr 60/01/2015 z dnia 23 lutego 2015 r.
- c) wszechkierunkowe źródło dźwięku z generatorem, wzmacniaczem i korektorem DL203, nr seryjny D1.090157, firmy Sinus Messtechnik GmbH (w dniu 11/12.05.2015 r. i 10.06.2015 r.),

3.1.4 Objętość pomieszczenia

Objętość pomieszczenia, obliczona na podstawie rysunków sali, wynosi około $V=2\,372\text{m}^3$. Pomieszczenie sali jest całkowicie zamknięte. Nie występują przestrzenie akustyczne powiązane z analizowanym wnętrzem.

3.1.5 Opis pomieszczenia z uwzględnieniem elementów wpływających na akustykę wnętrza

Badana aula pełni funkcje sali audytoryjnej przeznaczonej głównie do komunikacji słownej.

Sala oparta jest na planie prostokąta o wymiarach 12,66m x 24,78m (długość x szerokość). Sufit o sklepieniu kolebkowym ma wysokość od 4,13m do 8,45m w najwyższym punkcie.

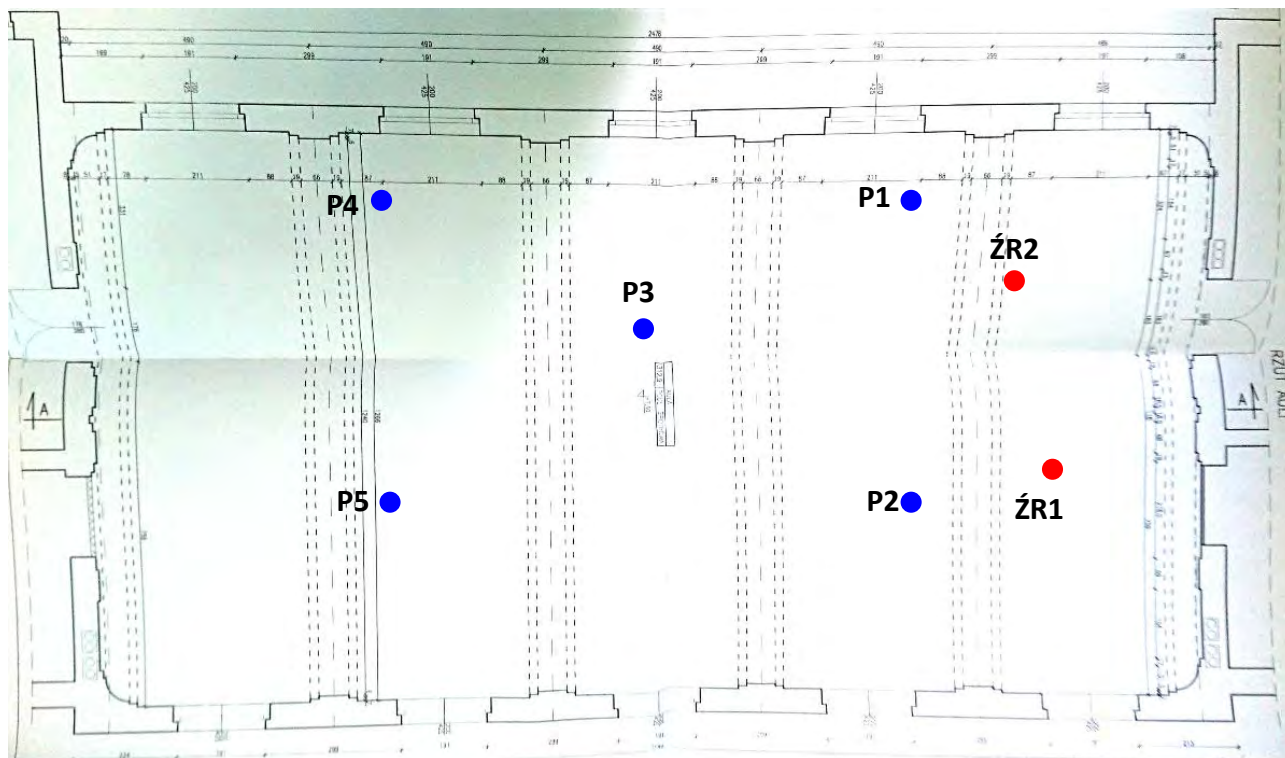
We wnętrzu nie zastosowano materiałów pochłaniających dźwięk. W stanie obecnym użyte elementy wykończenia nie spełniają standardów pod względem akustycznym. Na powierzchniach ograniczających pomieszczenie zastosowano:

- ściany pokryte tynkiem i pomalowane,
- kopułę stropu wspartą na dźwigarze dachowym, pokrytą tynkiem i pomalowaną,
- posadzkę z wykładziny PCV,
- okna na dwóch dłuższych ścianach (po 5 szt. na stronę)
- drzwi wejściowe na dwóch krótszych ścianach



3.1.6 Szkicowy plan pomieszczenia

Szkicowy plan auli w skali 1:200 z zaznaczonymi pozycjami mikrofonu (P1÷P5) oraz wszechkierunkowego źródła dźwięku (ŻR1 i ŻR2) przedstawiono poniżej.



Rys. 3.1. Plan auli z zaznaczoną lokalizacją punktów pomiarowych i położenia źródła dźwięku

3.1.7 Metoda wykonania pomiarów

Pomiary wykonano metodą precyzyjną z zastosowaniem szumu przerywanego. Pomieszczenie pobudzano wszechkierunkowym źródłem dźwięku zasilanym sygnałem elektrycznym będącym szerokopasmowym szumem różowym w zakresie od 88 Hz do 5657 Hz. W badanym zakresie częstotliwości dla wszystkich punktów pomiarowych poziom sygnału był wyższy od poziomu tła o 35 dB.

W pomieszczeniu zlokalizowano 5 punktów pomiarowych. W każdym punkcie pomiarowym wykonano 3 pomiary czasu pogłosu T_{20} dla dwóch położenia źródła dźwięku. Źródło dźwięku znajdowało się na wysokości 1,6m, co odpowiada przeciętnej wysokości ust człowieka w pozycji stojącej. Mikrofon pomiarowy znajdował się na wysokości 1,2 m, co odpowiada przeciętnej wysokości uszu człowieka w pozycji siedzącej.

W czasie wykonywania pomiarów czasu pogłosu w sali przebywała 1 osoba.

3.1.8 Wyniki pomiarów czasu pogłosu

Wyniki pomiarów w punktach pomiarowych P1÷P5 uśredniono z dwóch położenia wszechkierunkowego źródła dźwięku (żr1 i żr2), a następnie dokonano arytmetycznego uśrednienia wartości czasu pogłosu z wszystkich pozycji mikrofonu. Wartości czasu pogłosu odczytano przy użyciu programu komputerowego Samurai wersja 2.6.2

Poniżej znajduje się tabela zawierająca wartości czasu pogłosu $T_{20 \text{ sr t}}$ uśrednione po zbiorze z pięciu punktów pomiarów w pasmach tercjowych (1/3 oktawowych) w zakresie od 100 Hz do 5000 Hz.



Lokalizacja punktów pomiarowych i położenia źródła dźwięku jest zgodna ze szkicem przedstawionym w podpunkcie 3.1.6.

Tabela 3.1 Uśrednione wartości czasu pogłosu $T_{20\text{śrt}}$ [s] dla wszystkich położenia mikrofonu i źródła dźwięku

częstotliwość [Hz]	czas pogłosu $T_{20\text{śrt}}$ [s]	odchylenie standardowe σ_{20t} [s]
100	3,50	0,14
125	4,44	0,14
160	4,52	0,12
200	4,92	0,12
250	5,09	0,11
315	5,61	0,10
400	5,53	0,09
500	5,90	0,08
630	5,93	0,07
800	5,69	0,06
1000	5,27	0,05
1250	5,19	0,05
1600	4,67	0,04
2000	4,09	0,03
2500	3,70	0,03
3150	3,33	0,02
4000	2,77	0,02
5000	2,16	0,02

Obliczenia odchylenia standardowego serii pomiarów T_{20} dokonano zgodnie ze wzorem:

$$\sigma(T_{20}) = 0,88 \cdot T_{20} \cdot \sqrt{\frac{1 + (1,90/n)}{N \cdot B \cdot T_{20}}} \quad [3.1]$$

gdzie: B – szerokość pasma [Hz]

n – liczbą zaników zmierzonych w każdym punkcie

N – liczba niezależnych punktów pomiarowych (kombinacje pozycji źródła i odbiornika)

T_{20} – czas pogłosu [s], odpowiadającym 20 dB zakresowi

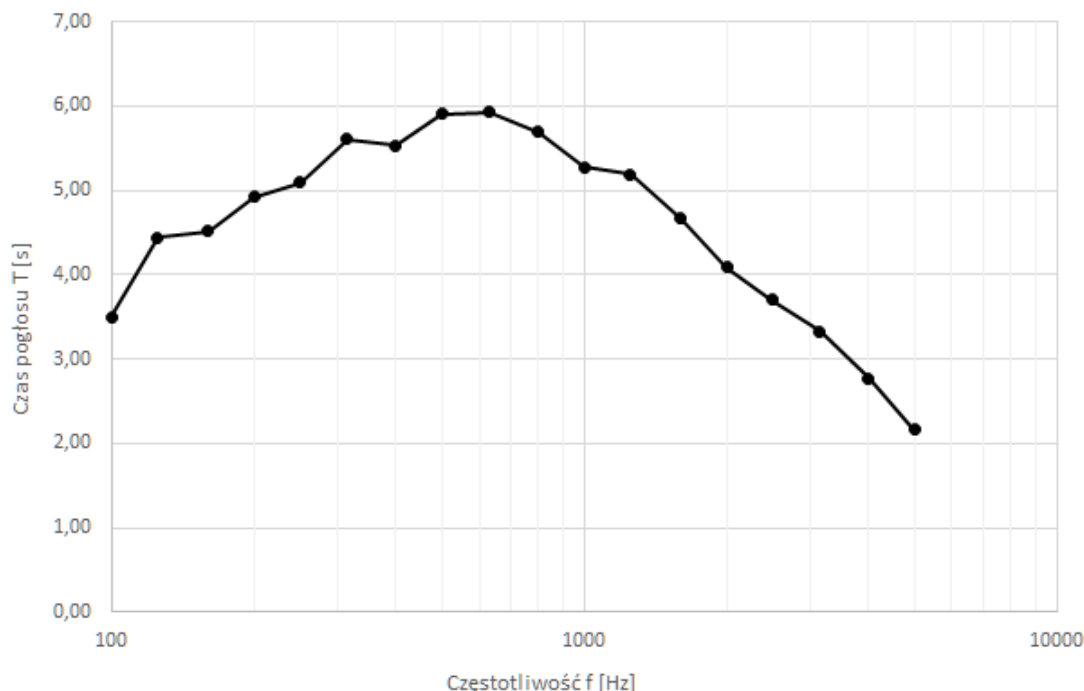
Średnią jednoczłonową wartość czasu pogłosu $T_{20\text{śr}}$ obliczono przez uśrednienie wartości $T_{20\text{śrt}}$ z sześciu pasm tercjowych o częstotliwościach środkowych od 400 Hz do 1250 Hz.

$$T_{20\text{śr}} = 5,59 \pm 0,07 \text{ s}$$

Uzyskane wyniki posłużą do kalibracji modelu obliczeniowego.

Poniżej znajduje się wykres przedstawiający wartość czasu pogłosu $T_{20\text{śrt}}$ w funkcji częstotliwości.





Wykres 3.1. Zmierzony czas pogłosu $T_{20\text{śrt}}$ w funkcji częstotliwości

3.2 Wymagania czasu pogłosu i wskaźnika zrozumiałości mowy

Zgodnie z art. 323 ust. 2 pkt 4 rozporządzenia Ministra Infrastruktury [7] wynikającego z ustawy Prawo budowlane [6], pomieszczenia w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej należy chronić przed hałasem pogłosowym, powstającym w wyniku odbić fal dźwiękowych od przegród ograniczających dane pomieszczenie. Natomiast art. 326 pkt 5 mówi, że w pomieszczeniach budynków użyteczności publicznej, których funkcja związana jest z odbiorem mowy lub innych pożądaných sygnałów akustycznych, należy stosować takie rozwiązania budowlane oraz dodatkowe adaptacje akustyczne, które zapewnią uzyskanie w pomieszczeniach odpowiednich warunków określonych odrębnymi przepisami. Adaptacje akustyczne należy wykonywać z materiałów o potwierdzonych właściwościach pochłaniania dźwięku wyznaczonych zgodnie z Polską Normą określającą metodę pomiaru pochłaniania dźwięku przez elementy budowlane.

Wymagania dotyczące ograniczenia hałasu pogłosowego w pomieszczeniach określa Polska Norma PN-B-02151-4 [5] za pomocą parametrów czasu pogłosu T oraz wskaźnika zrozumiałości mowy STI .

Według wytycznych zawartych w ww. normie maksymalna wartość czasu pogłosu T [s] oraz minimalna wartość wskaźnika zrozumiałości mowy STI w salach audytoryjnych, w zależności od objętości pomieszczenia, powinna wynosić zgodnie z tabelą poniżej.

Wymagania dotyczą pomieszczeń wykończonych, umeblowanych w sposób typowy dla przeznaczenia, bez obecności ludzi.



Tabela 3.2 Wymagane wartości czasu pogłosu T i wskaźnika zrozumiałości mowy STI w pomieszczeniach przeznaczonych do komunikacji słownej [5]

Lp.	Pomieszczenie		Wymaganie	
	Rodzaj pomieszczenie	Kubatura pomieszczenia V [m ³]	Czas pogłosu T [s]	Wskaźnik zrozumiałości mowy STI
1.1	Sale i pracownie szkolne, sale audytoryjne, wykładowe w szkołach podstawowych, średnich i wyższych i inne pomieszczenia o podobnym przeznaczeniu ^b	≤ 120	$\leq 0,6^a$	-
1.2		120 - 250	$\leq 0,6^a$	$\geq 0,60$
1.3		250 - 500	$\leq 0,8$	
1.4		500 - 2000	$\leq 1,0$	
1.5		> 2000	Określić indywidualnie	Określić Indywidualnie ^d
2.1	Sale rozpraw sądowych, sale konferencyjne, audytoria i inne pomieszczenia o podobnym przeznaczeniu ^c	≤ 500	$\leq 0,8$	$\geq 0,60$
2.2		500 - 2000	$\leq 0,1$	
2.3		> 2000	Określić indywidualnie	Określić Indywidualnie ^d

^a W pomieszczeniach przeznaczonych do prowadzenia zajęć dla osób z ubytkami słuchu/lub innymi problemami z komunikacją słowną, maksymalny czas pogłosu T nie powinien być większy niż 0,4s. W pomieszczeniach przeznaczonych do prowadzenia zajęć w ramach nauczania początkowego lub nauczania języków obcych, zaleca się zmniejszyć czas pogłosu T o 0,1s w stosunku do wartości podanych w tablicy.

^b Wymagania dotyczące wskaźnika zrozumiałości mowy STI należy spełnić przy komunikacji słownej bez wykorzystania systemu nagłaśniającego również w pomieszczeniach, w których taki system jest.

^c W przypadku pomieszczeń, w których wyłączną metodą zapewnienia zrozumiałości mowy jest zastosowanie systemu nagłaśniającego, wg PN-EN ISO 9921, nie stawia się wymagań dotyczących wskaźnika zrozumiałości mowy STI dla komunikacji słownej bez wykorzystania nagłośnienia. W takim przypadku, wymagania dotyczące czasu pogłosu T pozostają bez zmian.

^d Zaleca się uwzględnić PN-EN 60268-16.

Norma określa maksymalne wartości czasu pogłosu w przedziale częstotliwości 125Hz – 8kHz. Wartości podane w Tabeli 2 muszą być spełnione dla pasm oktaowych o częstotliwościach środkowych 250 Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz i 8kHz. W paśmie oktaowym o częstotliwości środkowej 125Hz wartość czasu pogłosu może być o 30% większa od wartości wymaganej. Zaleca się, aby charakterystyka czasu pogłosu w funkcji częstotliwości była możliwie płaska, oraz aby różnice pomiędzy wartościami czasu pogłosu dla sąsiednich pasm oktaowych była jak najmniejsza.

Wymagania dotyczące wskaźnika zrozumiałości mowy STI są nadrzędne w stosunku do wymagań dotyczących czasu pogłosu T . Oznacza to, że w uzasadnionych przypadkach, udokumentowanych obliczeniami, dopuszcza się przekroczenie wartości czasu pogłosu T , jeżeli jest to niezbędne do spełnienia wymagań dotyczących wartości wskaźnika zrozumiałości mowy STI .

Założenia projektowe:

- Obliczona na podstawie rysunków objętość sali wynosi około: **$V=2\ 372\text{m}^3$**
- Przyjęto, że dla obliczonej objętości sali, wartość czasu pogłosu w przedziale częstotliwości 125Hz – 8kHz powinna być nie większa niż **$T_{\text{wym}} \geq 1,0\text{ s}$** bez obecności ludzi, przy czym dla częstotliwość środkowej 125Hz wartość czasu pogłosu może być o 30% większa i wynosić 1,3 s,
- Przyjęto, że dla obliczonej objętości sali, wartość wskaźnika zrozumiałości mowy będzie nie mniejsza niż **$STI_{\text{wym}} \geq 0,60$** , co według przyjętej klasyfikacji odpowiada dobrej zrozumiałości mowy.



3.3 Ocena jakości akustycznej sali w stanie obecnym

Przyjęta wymagana maksymalna wartość czasu pogłosu T w pasmach oktaowych w przedziale 125Hz – 8kHz dla sali audytoryjnej w Liceum Ogólnokształcącym w Ząbkowicach Śląskich wynosi $T_{wym} \leq 1,00$ s (dla 125Hz – $\leq 1,3$ s). Zmierzony czasu pogłosu $T_{20\text{śr}} = 5,59$ s w auli w stanie obecnym jest **ponad pięciokrotnie większy** od wymaganej wartości czasu pogłosu T_{wym} . Długi czas pogłosu przekłada się bezpośrednio na większy hałas pogłosowy. Różnicę poziomu dźwięku pomiędzy stanem obecnym, a stanem wymaganym dla tego typu sali (zgodnie z ww. normą) można obliczyć ze wzoru:

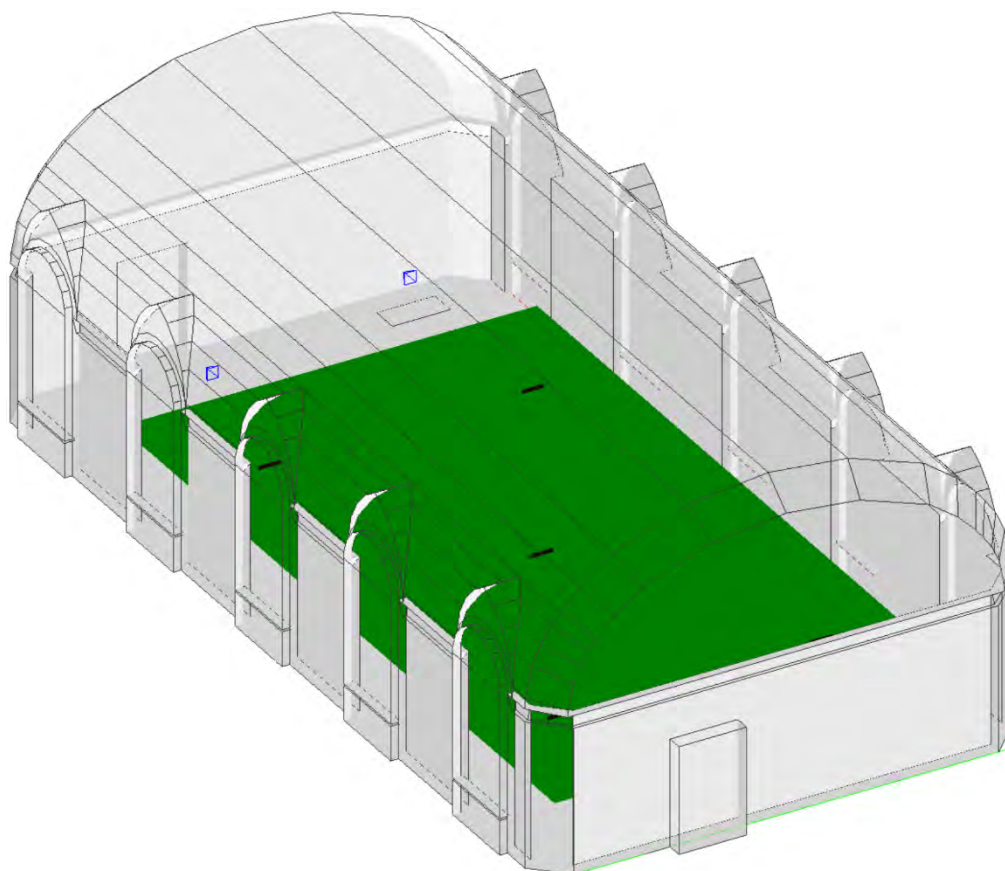
$$\Delta L = 10 \cdot \log \left[\frac{T_{20\text{śr}}}{T_{wym}} \right] \quad [3.2]$$

Z powyższej zależności wynika, że hałas panujący w auli w stanie obecnym jest o ok. **7,5 dB** wyższy od hałasu, który występowałby przy wymaganym czasie pogłosu.

Stwierdza się zatem, że, czas pogłosu w auli Liceum Ogólnokształcącego w Ząbkowicach Śląskich nie spełnia wymagań zawartych w Polskiej Normie PN-B-02151-4 [5].

3.4 Model komputerowy

W celu obliczenia parametrów akustycznych sali po zastosowaniu adaptacji akustycznej wykonano model komputerowy w programie EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers) Version 4.4.11.4 (Acoustics, Aura, Vision). Poniżej przedstawiono widok sali w 3D stanowiący wydruk z ww. programu.



Rys. 3.2. Model 3D auli w Liceum Ogólnokształcącym w Ząbkowicach Śląskich

3.5 Wytyczne adaptacji akustycznej

Ze względu na zabytkowy charakter obiektu, sala objęta jest opieką konserwatorską, co wiąże się z brakiem możliwości montażu na stałe jakichkolwiek ustrojów dźwiękochłonnych oraz dokonywania zmian w istniejącej architekturze obiektu.

W celu zmniejszenia efektu trzepoczącego echa (flutter echo - wielokrotnego odbicia dźwięku od dwóch równoległych, odległych ścian) zaleca się zastosować materiały pochłaniające dźwięk na przynajmniej jednej z przeciwnych ścian na wysokości poniżej 3,0 m.

W celu obniżenia czasu pogłosu proponuje się zastosowanie kotar akustycznych na powierzchni 43,50 m² na ścianie krótkiej (wysokość kotary 4m) oraz na powierzchni 111 m² na ścianach długich (wysokość kotar 4m). Wymiary sali to 12,66m x 24,78m.

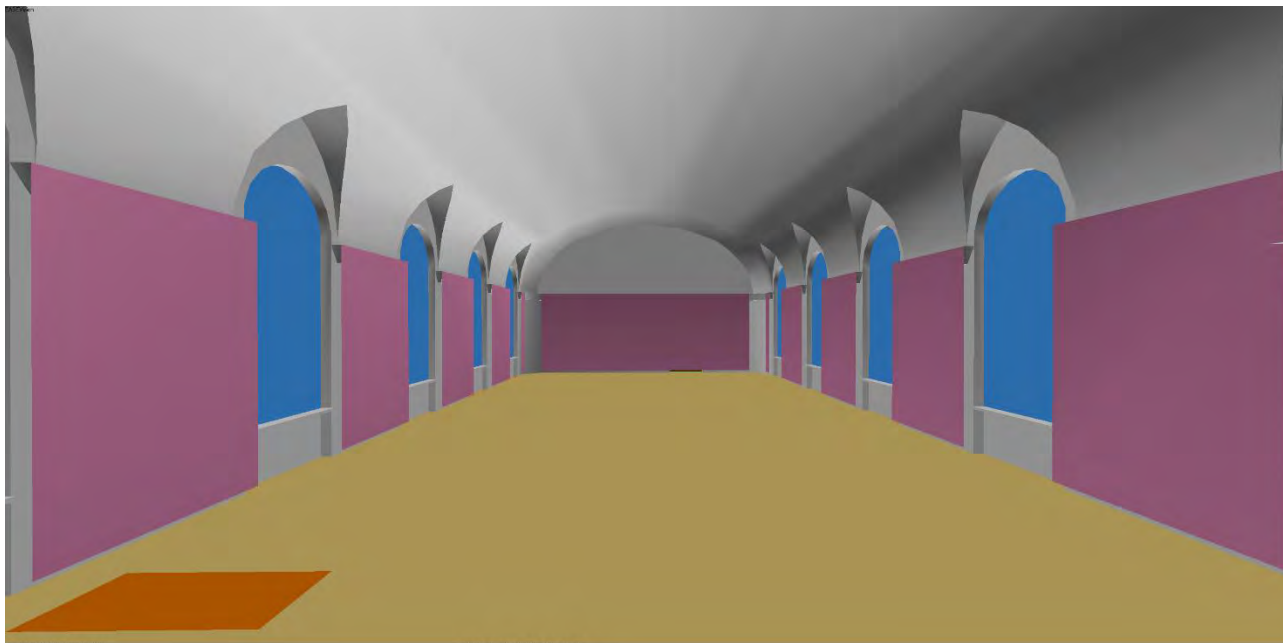
Poniżej przedstawiono opis możliwych wariantów ich zasłonięcia:

- a) wariant 1 – okna odsłonięte po obu stronach + kotara z tyłu
 - na obu dłuższych ścianach, na całej szerokości fragmentów ściany znajdujących się między oknami, montaż kotary akustycznej o wysokości 4m zawieszanej do gzymsu dekoracyjnego na wysokości 4,13m
 - na krótszej ścianie znajdującej się za słuchaczami, na całej szerokości ściany, montaż kotary akustycznej o wysokości 4m zawieszanej do gzymsu dekoracyjnego na wysokości 4,13m
- b) wariant 2 – okna zasłonięte po obu stronach + kotara z tyłu
 - na obu dłuższych ścianach, na całej szerokości wnęk okiennych oraz na fragmentach ściany po obu stronach okna w odległości 0,5m od krawędzi wnęki, montaż kotary akustycznej o wysokości 4m zawieszanej do gzymsu dekoracyjnego na wysokości 4,13m
 - na krótszej ścianie znajdującej się za słuchaczami, na całej szerokości ściany, montaż kotary akustycznej o wysokości 4m zawieszanej do gzymsu dekoracyjnego na wysokości 4,13m
- c) wariant 3 – okno odsłonięte po jednej stronie i zasłonięte po drugiej stronie + kotara z tyłu
 - na jednej dłuższej ścianie, na całej szerokości fragmentów ściany znajdujących się między oknami, montaż kotary akustycznej o wysokości 4m zawieszanej do gzymsu dekoracyjnego na wysokości 4,13m
 - na drugiej dłuższej ścianie, na całej szerokości wnęk okiennych oraz na fragmentach ściany po obu stronach okna w odległości 0,5m od krawędzi wnęki, montaż kotary akustycznej o wysokości 4m zawieszanej do gzymsu dekoracyjnego na wysokości 4,13m
 - na krótszej ścianie znajdującej się za słuchaczami, na całej szerokości ściany, montaż kotary akustycznej o wysokości 4m zawieszanej do gzymsu dekoracyjnego na wysokości 4,13m

zgodnie z wizualizacjami poniżej:



a) wariant 1 – okna odsłonięte po obu stronach + kotara z tyłu



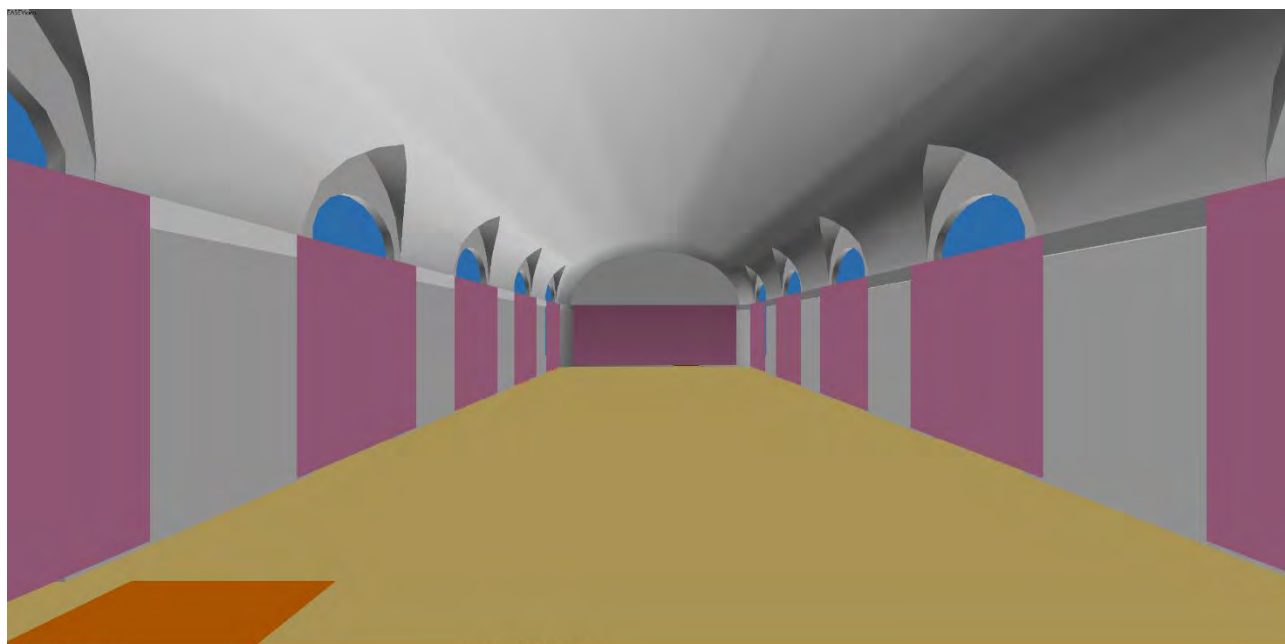
Rys. 3.3. Widok na ścianę tylną (ściana krótka za słuchaczami) – wariant 1



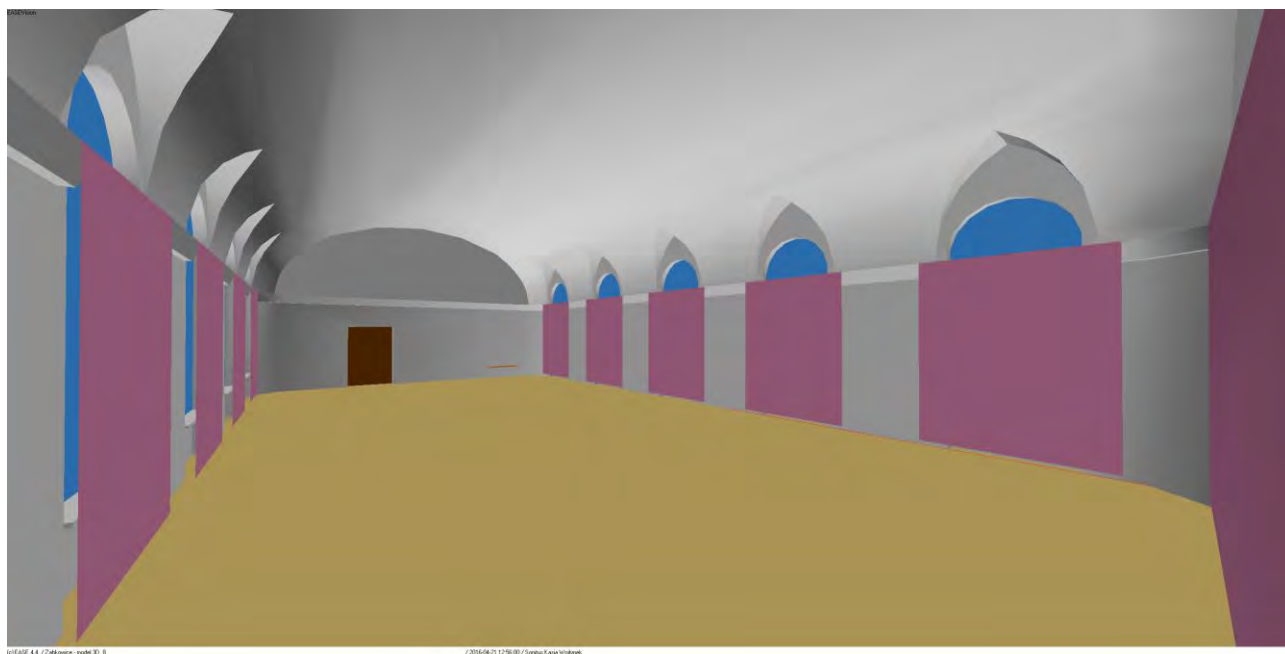
Rys. 3.4 Widok na ścianę przednią (ściana krótka przy mównicy) – wariant 1



b) wariant 2 – okna zasłonięte po obu stronach + kotara z tyłu



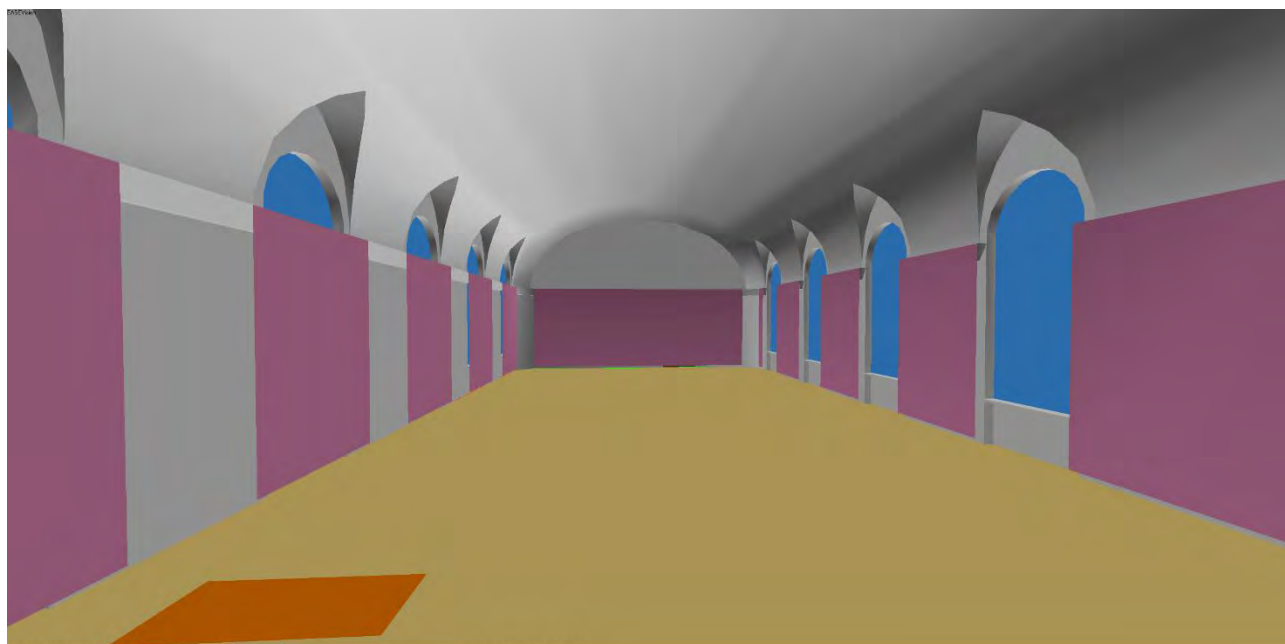
Rys. 3.5. Widok na ścianę tylną (ściana krótka za słuchaczami) – wariant 2



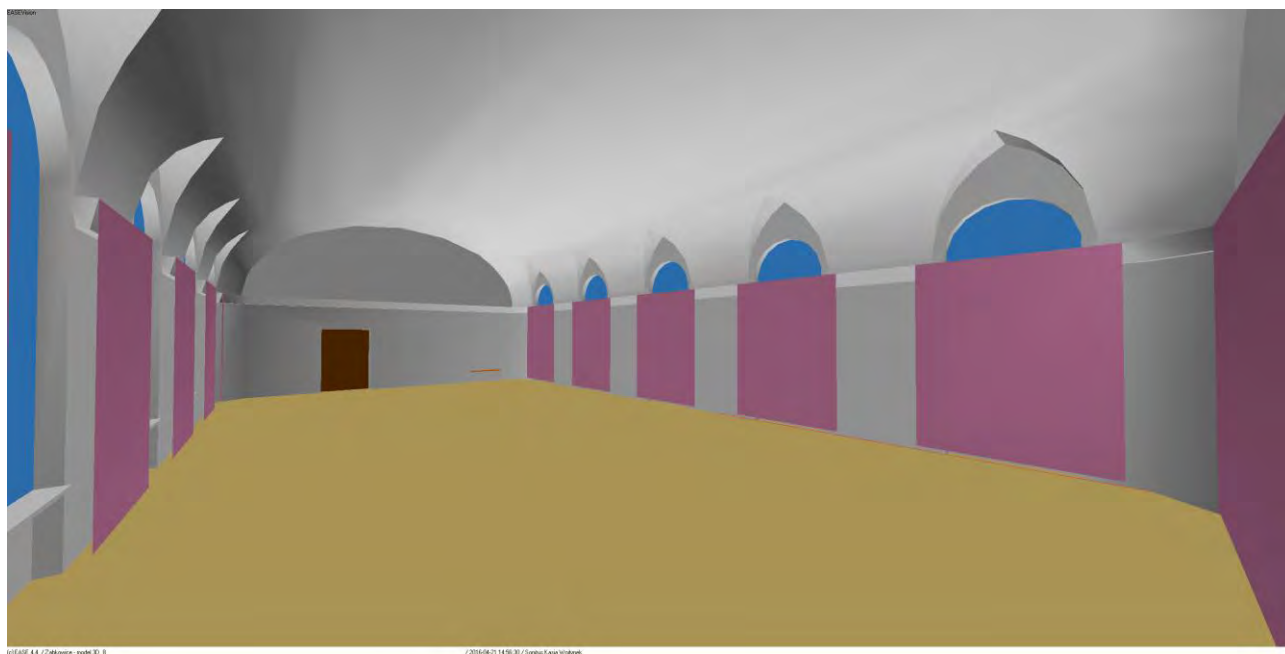
Rys. 3.6. Widok na ścianę przednią (ściana krótka przy mównicy) – wariant 2



c) wariant 3 – okno odsłonięte po jednej stronie i zasłonięte po drugiej stronie + kotara z tyłu



Rys. 3.7. Widok na ścianę tylną (ściana krótka za słuchaczami) – wariant 3



Rys. 3.8. Widok na ścianę przednią (ściana krótka przy mównicy) – wariant 3

3.6 Wyniki obliczeń parametrów akustycznych

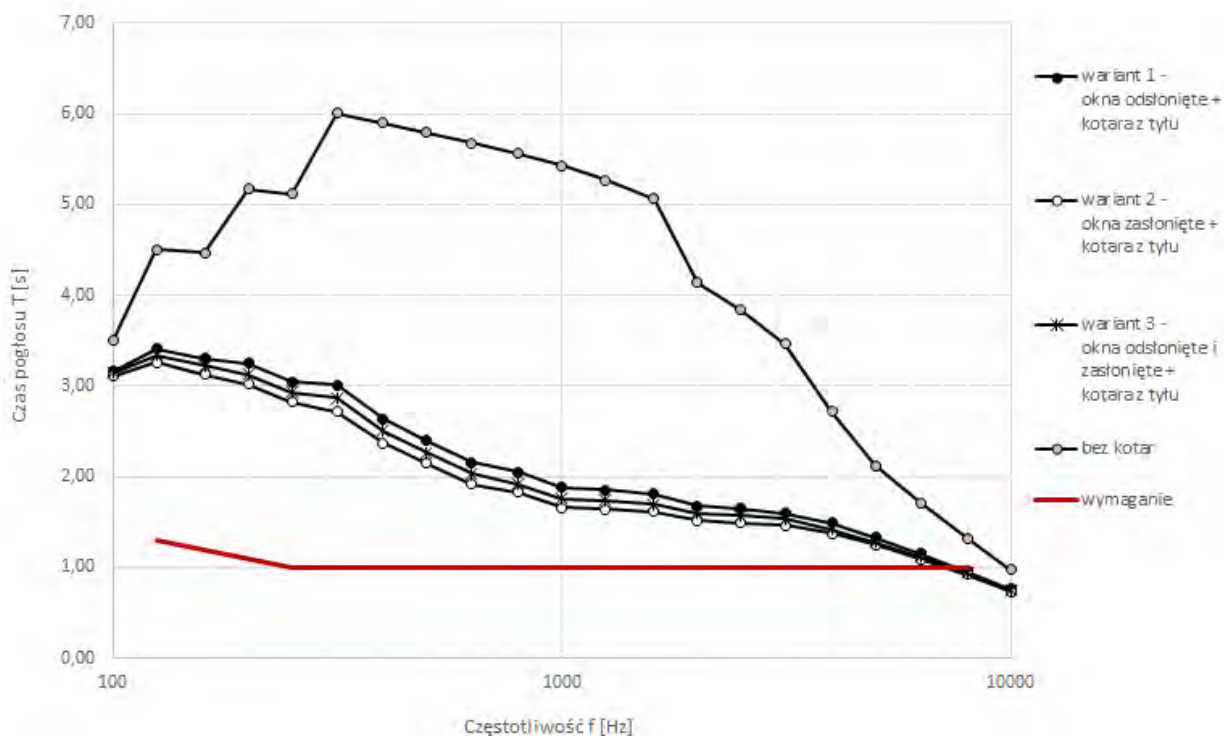
Za źródła dźwięku w modelu obliczeniowym przyjęto 2 dookólne źródła szerokopasmowe zlokalizowane przy krótkiej ścianie, na wysokość 1,6m, w miejscu przeznaczonym dla wykładowcy lub prelegenta. Powierzchnię pomiarową, dla której przeprowadzono obliczenia, wyznaczono na znacznej części powierzchni podłogi na wysokości 1,2m, w planowanym miejscu przebywania słuchaczy. Obliczenia wykonano dla sali nie wypełnionej słuchaczami.

3.6.1 Analiza czasu pogłosu T_{20}

Tabela 1. Wyniki obliczeń czasu pogłosu w sali po adaptacji

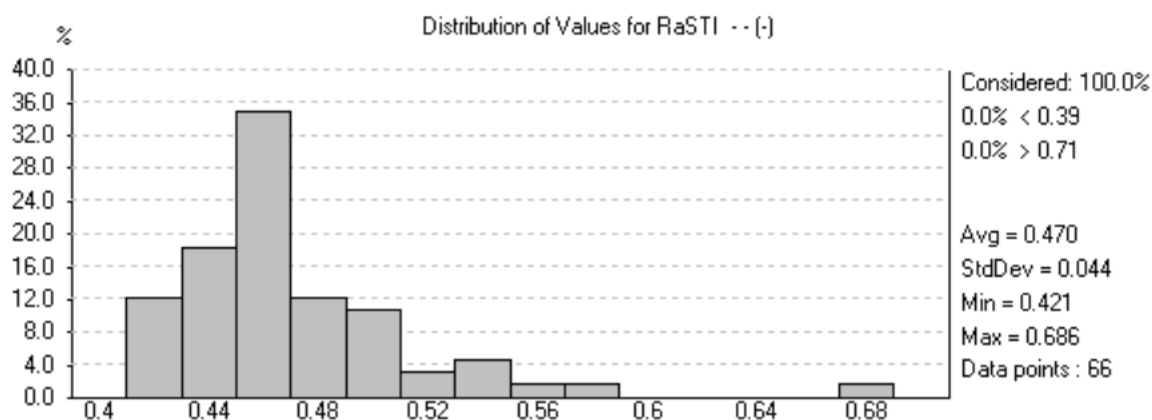
częstotliwość [Hz]	czas pogłosu po adaptacji akustycznej T [s]					
	wariant 1		wariant 2		wariant 3	
100	3,16	3,29	3,11	3,17	3,14	3,23
125	3,41		3,26		3,34	
160	3,30		3,13		3,22	
200	3,25	3,10	3,02	2,85	3,13	2,98
250	3,05		2,82		2,93	
315	3,01		2,72		2,87	
400	2,64	2,40	2,37	2,15	2,50	2,26
500	2,40		2,15		2,26	
630	2,16		1,92		2,03	
800	2,05	1,93	1,83	1,71	1,92	1,81
1000	1,88		1,66		1,76	
1250	1,85		1,64		1,74	
1600	1,81	1,71	1,61	1,54	1,69	1,62
2000	1,68		1,52		1,60	
2500	1,65		1,49		1,57	
3150	1,60	1,47	1,46	1,36	1,53	1,41
4000	1,49		1,37		1,42	
5000	1,33		1,25		1,28	
średni czas pogłosu 400 - 1250 Hz $T_{20\text{ śr}}$ [s]	2,16		1,93		2,03	



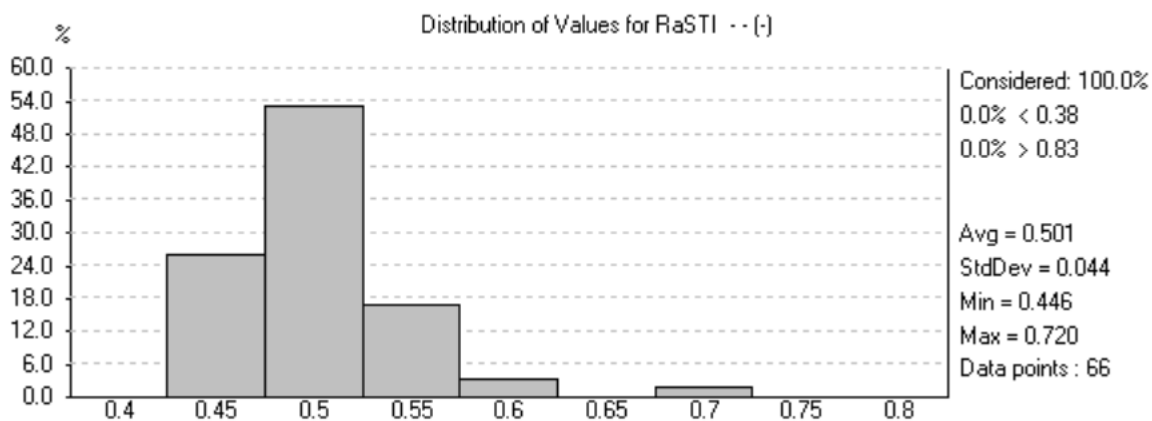


Wykres 3.2. Obliczony czas pogłosu T_{20} w funkcji częstotliwości po adaptacji akustycznej

3.6.2 Analiza parametru zrozumiałości mowy RASTI

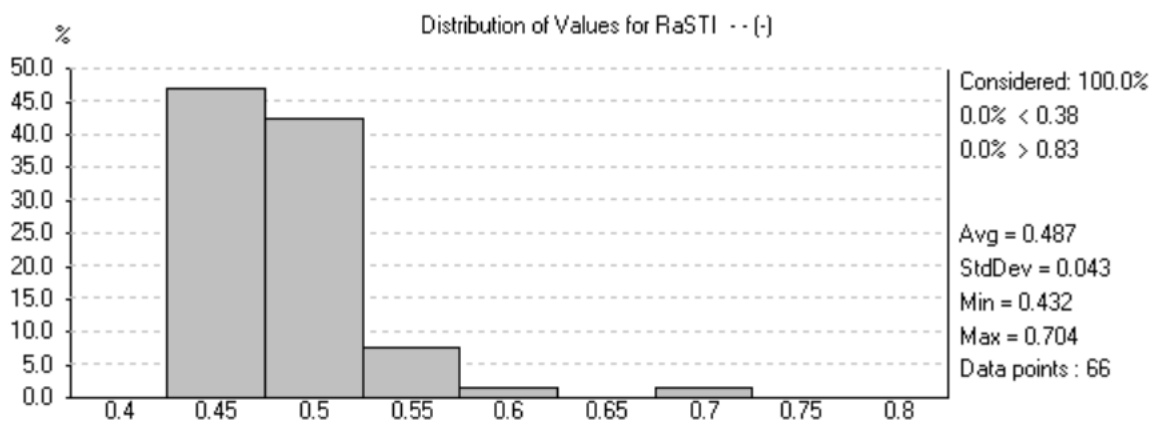


Wykres 3.3. Rozkład parametru zrozumiałości mowy RASTI w sali po adaptacji akustycznej – wariant 1



Wykres 3.4. Rozkład parametru zrozumiałości mowy RASTI w sali po adaptacji akustycznej – wariant 2





Wykres 3.5. Rozkład parametru zrozumiałości mowy RASTI w sali po adaptacji akustycznej – wariant 3

3.7 Wnioski

Zastosowanie adaptacji akustycznej pomieszczenia w postaci kotar akustycznych np. Tuchler Molton Sceniczny B1 300 wpłynie na znaczną poprawę warunków akustycznych. Czas pogłosu obniży się z niemal 6 do około 2s.

Osiągnięcie wymaganego czasu pogłosu 1s wiązałoby się z zastosowaniem materiałów akustycznych zamontowanych na trwałe na suficie, co wiązałoby się z koniecznością uzyskania zgody konserwatora.

4 ZALECENIA

Ze względu na niedoskonałości modelu obliczeniowego zaleca się, by wykonać pomiary czasu pogłosu auli po wykonaniu całości prac związanych z akustyką wnętrza. Pozwoli to na zweryfikowanie uzyskanych wyników i ewentualne wprowadzenie korekt do wytycznych.



5 SYSTEM NAGŁOŚNIENIA

5.1 Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania jest projekt przenośnego systemu nagłośnienia sali sportowej w zabytkowym obiekcie Auli Liceum Ogólnokształcącego w Ząbkowicach Śląskich przy ul. Powstańców Warszawy 8c.

5.2 Opis funkcjonalny

Aby umożliwić właściwe nagłośnienie Sali podczas inauguracji oraz imprez artystycznych przewidziano profesjonalne urządzenia foniczne wraz z systemem zaciemnienia okien służącym jako element adaptacji akustycznej Sali.

Do nagłośnienia Sali wybrane zostały zestawy głośnikowe przenośne, z wbudowanym wzmacniaczem mocy. Zestawy te w ilości 6 kompletów można będzie rozkładać równomiernie po obu stronach Sali (jej dłuższych boków z oknami), na przenośnych statywach kolumnowych z regulowaną wysokością, podłączanych do gniazd ściennych: gniazda zasilającego 230V oraz gniazda sygnałowego fonicznego, zamontowanych nad listwą przypodłogową.

Trasy kablowe do punktów podłączeniowych przenośnych aktywnych zestawów głośnikowych prowadzone będą w korytkach nad listwą przypodłogową i sprowadzać się będą w miejscu ustawiania przejezdnej szafki typu case-rack z przenośnym mikserem fonicznym audio, w prawym rogu sali, patrząc na ścianę z godłem.

W systemie nagłośnienia przewidziano również dwa profesjonalne mikrofony bezprzewodowe trzymane w ręce lub na statywie podłogowym oraz odtwarzacz CD/USB. Odbiorniki mikrofonów bezprzewodowych oraz odtwarzacz CD/MP3 zostaną umieszczone w przejezdnym case-racku.

5.3 Opis techniczny

Zestawy głośnikowe Aktywne DYNACORD AXM12, lub równoważne, z wbudowanym wzmacniaczem, statyw podłogowy estradowy. Ilość: 6 szt./kpl.



Zestaw głośnikowy Dynacord AXM12 łączy w sobie wysokiej jakości urządzenie głośnikowe koaksjalne 12"/1,75" o kącie propagacji wynoszącym 90 stopni, cyfrowy procesor zapewniający funkcje takie jak: 3 punktowa korekcja, półkowa i parametryczna; przestrajalny filtr Low Cut; filtr anty-sprężeniowy; zwrotnicę; limiter oraz presety z wykorzystaniem filtrów IIR i FIR oraz dwukanałowy wzmacniacz o łącznej mocy 520W (IHF-A). Wzmacniacz basowy pracuje w klasie D i dysponuje mocą 360W, natomiast wzmacniacz wysokotonowy to klasa AB o mocy 160W. Pozwala to wygenerować maksymalny SPL na poziomie 128dB.

Na bocznym panelu znajdują się trzy regulowane wejścia: dwa MIC/Line ze złączami Combo z możliwością załączenia zasilania phantom dla każdego z gniazd oraz AUX stereo z gniazdami RCA. W celu usprawnienia obsługi zestawu głośnikowe wyposażono w ciekłokrystaliczny wyświetlacz, wskazujący aktualny status pracy monitora oraz obrotowy enkoder, pozwalający w intuicyjny sposób wprowadzać korekty oraz wybierać spośród pięciu fabrycznych presetów, zmieniając charakterystykę i przystosowując urządzenie do pracy jako monitor i/lub element systemu nagłośnienia. Zoptymalizowany 33° kąt nachylenia urządzenia czyni go doskonałym rozwiązaniem, zapewniającym idealną odległość i maksymalny komfort pracy.

Obudowa została wykonana z 15mm sklejk brzozonej, pokrytej bardzo twardym lakierem strukturalnym. Front monitora zabezpiecza metalowy grill. Wygodne uchwyty wpuszczone w obudowę ułatwiają przenoszenie lub transport. Zintegrowany uchwyt pod statyw głośnikowy znacznie poszerza możliwości zastosowania monitora, pozwalając wykorzystać go jako przenośny system nagłaśniający.

Dane i parametry techniczne

- Aktywny monitor o wielofunkcyjnym zastosowaniu
- Maksymalna moc wzmacniacza IHF-A: 520W
- Wzmacniacz Low: 360W IHF-A, 260W RMS
- Wzmacniacz Mid-Hi: 160W IHF-A, 75W RMS
- Maksymalny SPL (1m): 128dB (calc.)
- Pasmo przenoszenia (-10dB): 50Hz-20kHz
- Dyspersja: 90° (h x v)
- Częstotliwość podziału: 1,6kHz
- Przetworniki: DCX12300, 12"/1,75", 2-drożny, współosiowy przetwornik wyposażony w lekki neodymowy driver kompresyjny.
- Złącza audio: Wejścia: 2x Mono, XLR/Jack (Mic/Line) z załączanym napięciem phantom (+15V) 1x Stereo RCA (AUX IN); Wyjścia: 1x XLR THRU (połączone z wejściem MIC/LINE1) 1x XLR MIX OUT
- Korekcja: Filtr półkowy: ±10dB / 60Hz; Filtr parametryczny: ±10dB / 70 – 12000Hz; Filtr półkowy: ±10dB / 12kHz.
- Filtry: Lo-cut: f=50-200Hz, 12dB/oct.; Feedback: 70-1000Hz, notch, -10dB 5.2 - 2.7 A
- Delay: 0-100m
- Presety: 5 fabrycznych, 5 użytkownika
- Zasilanie: 100 – 240V AC, 50-60Hz
- Pobór mocy: 0.8-0.5 A
- Chłodzenie: Pasywne
- Klasa bezpieczeństwa: I
- Wymiary (WxHxD): 414 x 339 x 484
- Materiał obudowy: 15mm sklejka brzożowa
- Wykończenie obudowy: Twardy lakier strukturalny



- Kolor: Czarny (RAL 9005, jet black)
- Grill: Malowana proszkowo stal, gąbka akustyczna
- Flansa do statywu: 1
- Uchwyty: Poprzeczka, 2 wpuszczane uchwyty

Zestaw mikrofonu bezprzewodowego Sennheiser XSW 35, lub równoważny. Ilość: 2 kpl.



Zestaw składa się z nadajnika ręcznego typu handheld oraz odbiornika.

- prosty w obsłudze zestaw "wszystko w jednym" przeznaczony do zastosowań wokalnych i prezentacji;
- do dyspozycji pasmo o szerokość 24 MHz;
- kapsuła mikrofonowa zapewnia optymalną transmisję w warunkach wysokiego poziomu dźwięku;
- 8 banków częstotliwości do 12 presetów w każdym;
- odporność na sprzężenia akustyczne;
- przełącznik MUTE;
- wybór częstotliwości z krokiem 25 kHz.

Dane techniczne:

- Zakres częstotliwości 548 ... 865 MHz
- Liczba częstotliwości nośnych 960
- Liczba presetów 12
- Szerokość pasma roboczego 24 MHz
- Stosunek sygnał / szum > 103 dBA
- Zawartość zniekształceń harmoniczných < 1 %

Odbiornik różnicowy true diversity

- Złącze antenowe 2 x BNC, 50 Ohm
- Poziom wyjściowy audio (zbalansowany) XLR: +14 dBu maks
- Poziom wyjściowy audio (niezbalansowany) Jack: +8 dBu maks.
- Wymiary 200 x 127 x 42 mm
- Waga 730 g



Nadajnik

- Pasmo przenoszenia 80 - 16000 Hz
- Moc wyjściowa nadajnika 10 mW
- Zasilanie 2 baterie AA
- Czas pracy nadajnika > 10 godzin
- Wymiary (nadajnik) długość: 250 mm, średnica: 54 mm
- Waga (nadajnik) 240 g
- Rodzaj przetwornika dynamiczny
- Czułość AF 1,5 mV/Pa
- Maksymalny poziom dźwięku 149 dB (SPL)
- Charakterystyka kardoidalna

Mikser foniczny Dynacord CMS 600, lub równoważny. Ilość: 1 kpl.

Mikser ze zintegrowanym procesorem dźwięku 24/48-bit wyposażony w 4 wejścia mic/line i 4 wejścia stereo.



- Najwyższej jakości komponenty (tłumiki i potencjometry ALPS);
- Intuicyjne i przyjazne dla użytkownika pole robocze;
- Dwie edytowalne jednostki FX – każda wyposażona w 100 fabrycznych presetów oraz 20 presetów użytkownika;
- Profesjonalny interfejs USB 4x IN / 4x OUT z możliwością podłączenia komputera typu PC lub MAC;
- Korektor graficzny w sekcji głównej;
- Duży, kontrastowy wyświetlacz OLED;
- Waga 8kg.



Mikser foniczny CMS 600-3 to wielofunkcyjne urządzenie zamknięte w kompaktowej obudowie. Przygotowanie CMS do pracy jest bardzo proste i szybkie. Ergonomiczny kształt konsoli miksera oraz przejrzysty układ kontrolerów zapewniają doskonałe warunki pracy w każdym momencie. Mikser można również bezproblemowo zainstalować w 19" racku, zastępując plastikowe uchwyty boczne parą metalowych rack'owych zaczepów montażowych. Z uwagi na swoją wielofunkcyjność, wysoką dynamikę oraz ekstremalnie niski poziom szumów, w połączeniu z dwoma 24-bitowymi procesorami dźwięku, zintegrowanym interfejsem 4xI/O USB 2.0, CMS jest najlepiej wyposażonym mikserem dla uniwersalnego zastosowania.

Dane i parametry techniczne

- Kanały 4+2+2
- MIC/Line-Mono 4
- MIC/Line-Mono / USB-Stereo (Super Channel) 2
- Line L-R / CD-IN-Stereo 2
- AUX (AUX, MON) Przełączalny Pre/Post, Pre
- MIC GAIN (LINE -20 dB) +10 to +60 dB
- TRIM LINE/CD (Stereo) -10 to +20 dB
- THD, przy 1 kHz, MBW = 80 kHz Wejście MIC do Master A, wyjście L/R, +16dBu < 0.005%
- Pasma przenoszenia częstotliwości przy -3dB, 1kHz Dowolne wejście do dowolnego wyjścia w mikserze 15 Hz - 70 kHz
- Crosstalk, 1kHz Kanał do kanału < -80 dB; Wyciszenie Mute i Standby > 100 dB; Fader oraz tłumienie na wysyłkach FX/MON/AUX > 85 dB; CMRR, wejście mikrofonowe, 1kHz > 80 dB
- Czułość wejścia, wszystkie kontrolery poziomu w pozycji maksymalnej: MIC -74 dBu (155 µV); LINE (mono) - 54 dBu (1.55 mV); LINE (Stereo) -34 dBu (15.5 mV); CD (Stereo) -34 dBu (15.5 mV)
- Maksymalne poziomy miksera: Wejścia MIC +11 dBu; Wejścia LINE (mono) +31 dBu; Wejścia LINE (Stereo) +30 dBu; Pozostałe wejścia +22 dBu; Pozostałe wyjścia +22 dBu
- Oporność na wejściach: MIC 2 kOhms; Zwrotna 2Track i CD In 10 kOhms; Pozostałe wejścia > 15 kOhms
- Oporność na wyjściach: Słuchawki 47 Ohms; Pozostałe wyjścia 150 Ohm (symetryczne) / 75 Ohm (niesymetryczne); Ekwiwalent szumu na wejściu, Wejście MIC, A ważone, 150Ohm -130dBu
- Szum, wejścia kanałów Master A L/R wyjście, A-ważone: Master fader w poz. Dolnej -100 dBu; Master fader w poz. OdB, Fader kanału w poz. Dolnej. -92 dBu; Master fader w poz. OdB, fader kanału OdB -82 dBu
- Equalizacja: regulacja LO ±15 dB / 60 Hz; peaking MID ±12 dB / 2,4kHz; regulacja HI ±15 dB / 12 kHz; 9-zakresowy Master EQ (63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 6,3k,12kHz) ±10 dB / Q = 1.5 to 2.5.
- Filtry: wejścia mono, LO-CUT f = 80 Hz, 18 dB/oct.; głośnikowe LPN przełączany.
- Efekty: Typ Podwójne stereo 24/48-bit + procesor efektów
- Ustawienia 100 fabrycznych, 20 użytkownika
- zdalne sterowanie Przełącznik nożny MIDI
- Wyświetlacz 128 x 64 pikseli, OLED
- USB: Kanały 4 In / 4 Out; Konwersja AD/DA 24-bit; Próbkowanie 44.1 / 48 / 88.2 / 96 kHz; Interfejs PC USB2.0, Typ B żeński; Interfejs MIDI złącze 5-pin DIN, In / Out
- Wyjścia miksera AUX, MON, MASTER A L/R
- Przełączalne zasilanie (µC controlled) Limitery napięcia, zasilania o zbyt wysokim zbyt niskim napięciu
- Zasilanie Phantom 48 V DC
- Wymogi zasilania 100 V - 240 V AC, 50 Hz - 60 Hz
- Pobór mocy 35 W
- Klasa bezpieczeństwa I



- Temperatura operatywności Od +5 °C do +40 °C
- Wymiary: (szer. x wys. x głęb.)mm 416,9 x 108,6 x 347,8; Do montażu w racku: 483,0 x 99,1 x 332,6
- Waga netto 5,8kg
- Opcjonalne akcesoria: Zestaw montażowy do racka.

Profesjonalny przejezdny stojak Fabryka Cases, lub równoważny. Ilość: 1 kpl.

Caserack przejezdny zamykany na mikser i urządzenia pozostałe.



Odtwarzacz CD/USB DENON DN-300Z, lub równoważny. Ilość: 1 szt.



- odtwarzacz CD typu Slot-in
- obsługa USB, HDD oraz kart pamięci SD / SDHC
- bezprzewodowe odtwarzanie dźwięku z tabletów i smartfonów poprzez Bluetooth
- zakres działania Bluetooth do 33m
- odtwarzanie płyt CD-DA, MP3, WAV i AAC
- wbudowany tuner AM/FM z wyjściem audio dedykowanym do multi-room
- wejście 3,5 mm (1/8") do podłączenia dowolnego urządzenia audio z wyjściem 3,5 mm
- symetryczne wyjścia XLR
- pamięć do ośmiu urządzeń Bluetooth pozwalająca na łatwe przełączanie źródeł bezprzewodowych audio
- funkcja Lock - możliwość zabezpieczenia działań na przednim panelu przed niepożądanym zatrzymaniem utworu
- konstrukcja Rack 19" 1U; odpinane uszy rack
- odpinany przewód zasilający; zasilanie 100-220V



5.4 Model komputerowy – rozmieszczenie przenośnych urządzeń głośnikowych

Opracowano akustyczny model komputerowy sali. Do modelowania wykorzystano pakiet obliczeniowy EASE 4.3. Model zastosowano do badań optymalizacyjnych systemu nagłośnienia.

Dla przenośnego systemu nagłośnienia przyjęto następujące, minimalne wymagania:

- zakres częstotliwości: 200-10000Hz,
- średni poziom ciśnienia akustycznego dla sali wynoszący min. 75 dB,
- uzyskanie możliwie najmniejszej nierównomierności rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego sali,
- zrozumiałość sygnału mowy w części audytorium nie mniejsza niż 0,4 STI
- odporność na wzbudzenia akustyczne dla mikrofonów.

Na podstawie symulacji komputerowych stwierdzono, że system ten zapewnia dobre nagłośnienie sali i spełnienie założeń projektowych.

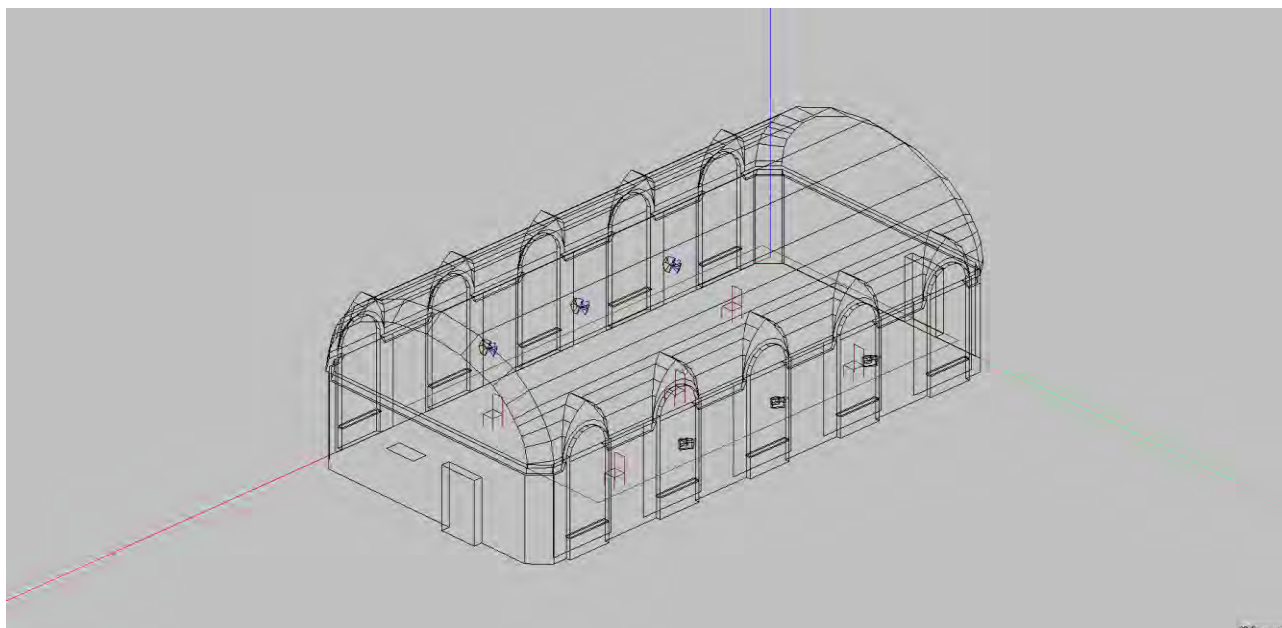
Parametry lokalizacyjne i kierunki propagacji zaprojektowanego układu przenośnych zestawów głośnikowych przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1 Lokalizacja i kierunki propagacji zaprojektowanego układu zestawów głośnikowych.

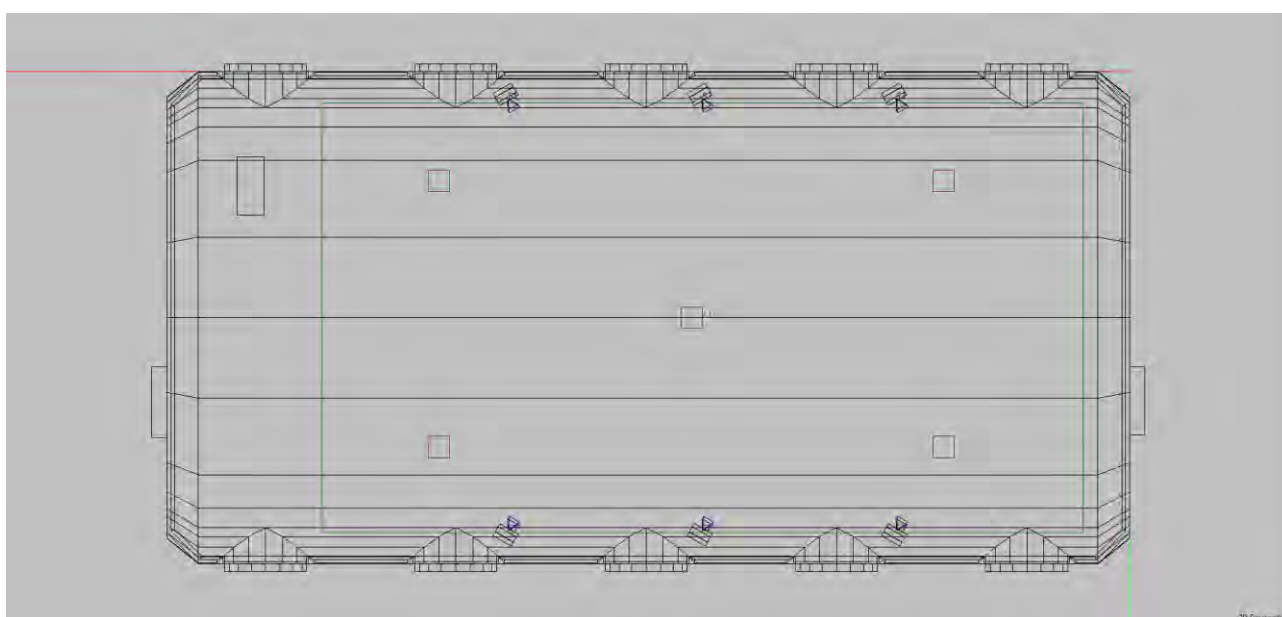
Oznac.	Rodzaj głośnika	X [m]	Y [m]	Z [m]	Hor [°]	Ver [°]	Rot [°]
S1	Zestaw głośnikowy przenośny	16.00	0.70	1.50	-150.0	-15.0	0.0
S1*	Zestaw głośnikowy przenośny	1.80	11.80	1.50	-30.0	-15.0	0.0
S2	Zestaw głośnikowy przenośny	11.00	0.70	1.50	-150.0	-15.0	0.0
S2*	Zestaw głośnikowy przenośny	11.00	11.80	1.50	-30.0	-15.0	0.0
S3	Zestaw głośnikowy przenośny	6.00	0.70	1.50	-150.0	-15.0	0.0
S3*	Zestaw głośnikowy przenośny	6.00	11.80	1.50	-30.0	-15.0	0.0

Na etapie realizacji projektu dopuszcza się odchylenia od podanych współrzędnych związane z ustawieniem przenośnych zestawów głośnikowych. Zmiany lokalizacji przenośnych zestawów głośnikowych najlepiej wykonać symetrycznie tj. dla lewych i prawych zestawów głośnikowych. Kąty nachylenia należy dobrać w trakcie prób, uruchamiania i strojenia systemu.





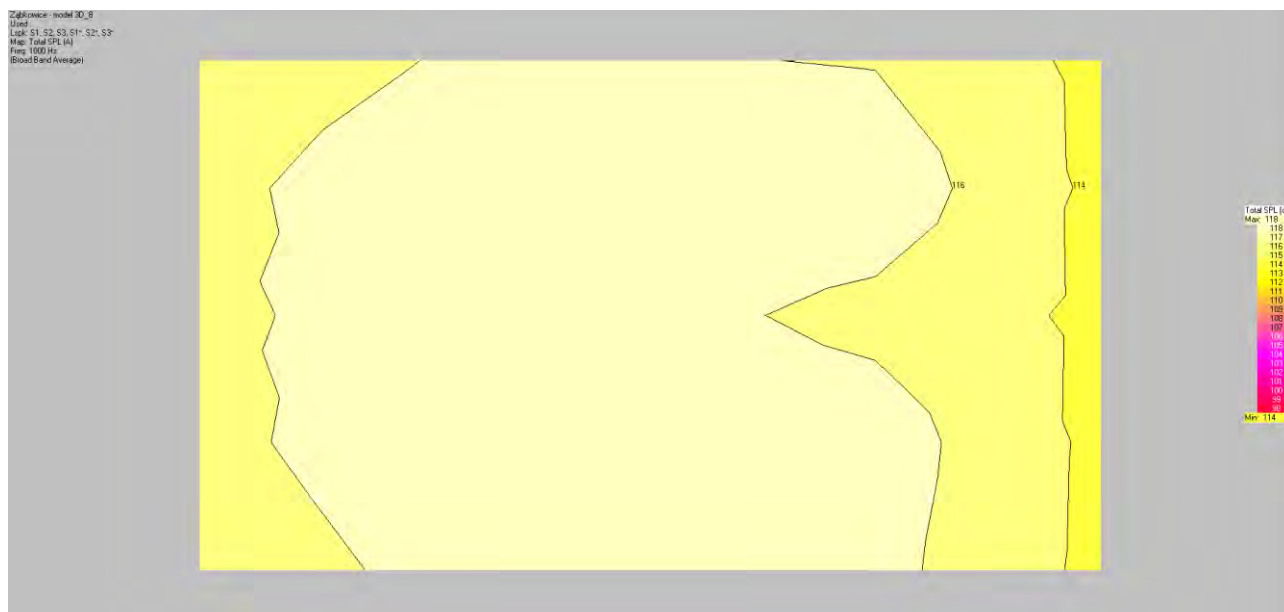
Rys. 1 Usytuowanie przenośnych zestawów głośnikowych, widok 3D.



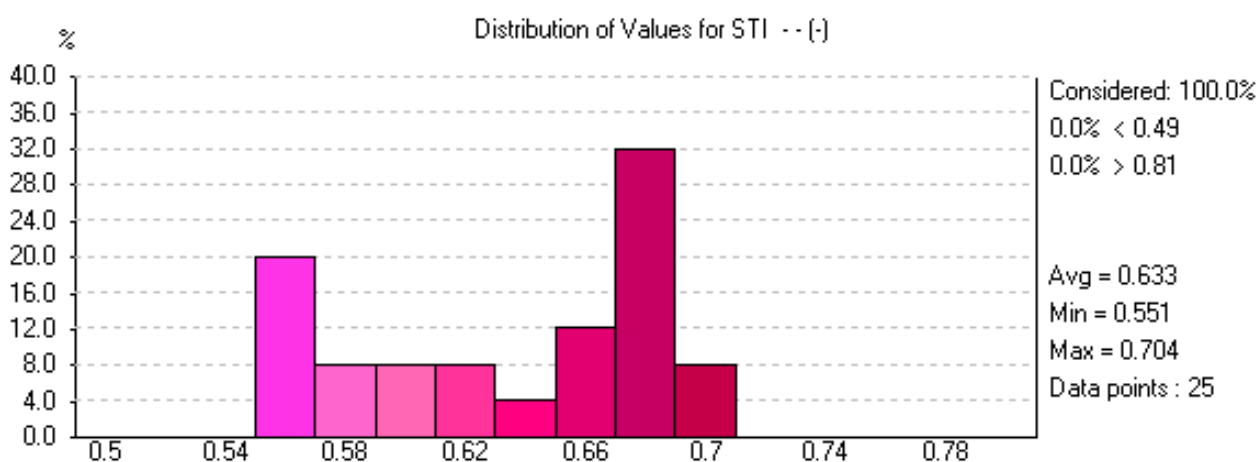
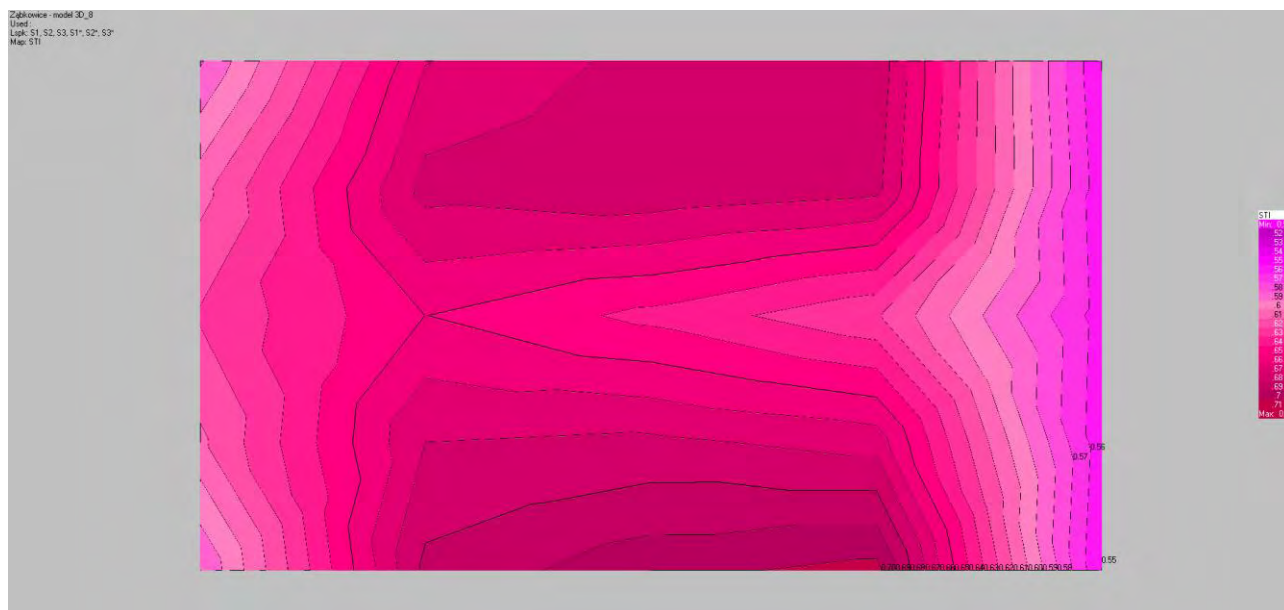
Rys. 2 Usytuowanie przenośnych zestawów głośnikowych, widok z góry

Wyniki symulacji:

Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego dźwięku wypadkowego w całym paśmie



Kontury rozkładu i statystyka wskaźnika zrozumiałości mowy STI



Wnioski z badań symulacyjnych:

- Zaprojektowany system zapewnia spełnienie założonych funkcji, tzn.: nagłośnienie sali dla potrzeb różnorodnych spotkań, wykładów oraz emisji komunikatów i zapowiedzi.
- Uzyskano równomierny rozkład poziomu dźwięku oraz odnotowano w całym paśmie średni poziom dźwięku min. 115dB dla znamionowej mocy urządzeń głośnikowych.
- Wskaźnik zrozumiałości mowy osiąga wartości z przedziału od 0,55 do 0,72 co oznacza dobrą zrozumiałość dla przekazów słownych.

