

WPLYW POGŁOSOWOŚCI NA INNE PARAMETRY AKUSTYCZNE POMIESZCZENIA

JABŁOŃSKI Marek ¹
MARCINIAK Justyna ²

¹ *Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Politechnika Łódzka*

² *Absolwentka Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska PŁ*

EFFECT OF REVERBERATION OF ROOM ON ITS OTHER ACOUSTICAL PARAMETERS

The results of the computer simulation concerning Reverberation Time of room, have been presented in the paper. The surface materials have been adjusted due to optimal value of this parameter. Finally the influence of reverberation time on other acoustical parameters have been analysed and discussed.

STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono wyniki symulacji komputerowej mającej na celu dopasowanie czasu pogłosu dla odbioru mowy i muzyki do wartości optymalnych poprzez zmianę rozwiązań materiałowych pomieszczenia. Następnie przeanalizowano wpływ takiego rozwiązania na inne, wybrane atrybuty akustyczne.

1. WSTĘP

W przypadku kościołów nie istnieją żadne kanony określające sposób budowy obiektów sakralnych. Jedynymi ograniczeniami, którymi architekci powinni się kierować podczas konstruowania nowych świątyń są wymagania liturgiczne określone przez Sobór Watykański II. Jeżeli chodzi o ukształtowanie wnętrza to pozostawiono zupełną swobodę w tym względzie byleby tylko zostały zachowane wymogi określone liturgią. Projektując wnętrze świątyni konieczna jest współpraca architekta, dekoratora wnętrz, plastyka oraz akustyka. Muszą oni pogodzić ze sobą oczekiwania wiernych co do wystroju wnętrza a także osiągnąć odpowiednie parametry akustyczne. Najważniejszą rzeczą, którą akustyk wnętrz musi wykonać na etapie projektowania lub dokonując adaptacji istniejącego wnętrza jest uzyskanie dobrej zrozumiałości mowy i muzyki poprzez uzyskanie odpowiedniej charakterystyki częstotliwościowej czasu pogłosu.

Obecnie powszechne staje się użycie technik komputerowych w celu modelowania akustycznego pomieszczeń. W niniejszej pracy zbudowano trójprzestrzenny model wnętrza projektowanego kościoła. Korzystając z powyższego modelu poszukiwano materiałów, które zapewniłyby optymalne wartości czasu pogłosu dla odbioru mowy i muzyki. Następnie po znalezieniu tych materiałów przeanalizowano wpływ parametrów związanych z pogłosowością pomieszczenia na inne, wybrane parametry akustyczne charakteryzujące subiektywnie odczuwaną akustykę wnętrz.

2. POGŁOSOWOŚĆ POMIESZCZENIA JAKO PARAMETR OCENY WŁASNOŚCI AKUSTYCZNYCH POMIESZCZEŃ

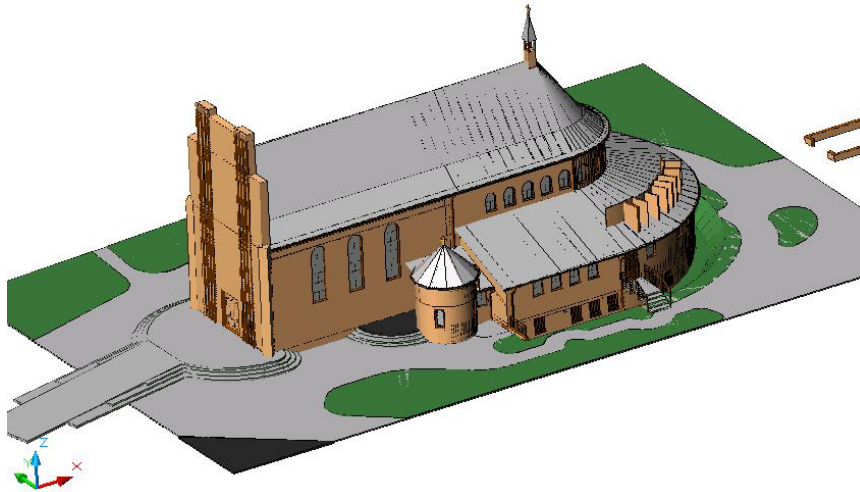
Z punktu widzenia wpływu pomieszczenia na jakość odtwarzanej w nim muzyki, jednym z najważniejszych parametrów jest czas pogłosu. Zbyt duża pogłosowość pomieszczenia z jednej strony zmniejsza zrozumiałość mowy, z drugiej jednak wpływa na polepszenie walorów brzmieniowych muzyki. Wydawać by się mogło, że aby uzyskać dużą wierność muzyki w pomieszczeniu, należy dążyć do jak najmniejszego czasu pogłosu. Okazuje się jednak, że tak nie jest. W silnie wytłumionym pomieszczeniu, gdzie czas pogłosu jest bardzo krótki, dźwięk jest nieprzyjemny, suchy, nienaturalny. Ponadto pogłosowość powoduje zwiększenie subiektywnie postrzeganej głośności i daje słuchaczowi poczucie otoczenia dźwiękiem. Pogłosowość pomieszczenia charakteryzują dwa parametry: czas pogłosu (RT, ang. Reverberation Time) wprowadzony przez Sabine'a [4] oraz czas wczesnego zaniku (EDT, ang. Early Decay Time) zaproponowany przez Jordana [2] w 1975 r. Czas pogłosu zależy od objętości pomieszczenia i cech fizycznych jego powierzchni - takich jak współczynnik pochłaniania i odbijania fal dźwiękowych - jak i również znajdujących się tam przedmiotów a także od ilości osób. Na jakość brzmienia muzyki oraz zrozumiałość mowy wpływa w decydujący sposób wartość oraz charakterystyka częstotliwościowa czasu pogłosu. Dla mowy zalecane jest utrzymywanie stałej wartości czasu pogłosu w dziedzinie częstotliwości. Wzrost na małych częstotliwościach pogarsza zrozumiałość. W przypadku muzyki, oczekiwania słuchaczy są przeciwne. Wzrost wartości czasu pogłosu do 50% na 125 Hz w odniesieniu do częstotliwości średnich uważa się za pożądany. Aby zapewnić zrozumiałość słowa mówionego należy zadbać o krótki czas pogłosu, muzyka wymaga znacznie dłuższego czasu pogłosu. W przeciwieństwie do RT, preferowane wartości EDT nie są określone. Dla zapewnienia korzystnych warunków akustycznych pomieszczenia, wartość początkowego czasu zanikania powinna być zbliżona do wartości czasu pogłosu. Najczęściej spotyka się sytuacje, w których EDT przyjmuje wartości mniejsze od czasu pogłosu, tzn. w początkowej części krzywej pogłosowej nachylenie jest bardziej strome niż w dalszej części. Potwierdzają to badania przeprowadzone przez Bradley'a [1].

3. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Analizowanym obiektem w niniejszej pracy jest kościół Parafii Niepokalanego Poczęcia Najświętszej Maryi Panny w Grotnikach koło Łodzi.

Świątynia została wybudowana w latach 1933-1938 przez rodzinę Jungowskich. W latach 1933-1939 obiekt należał do parafii św. Katarzyny w Zgierzu. W latach 1946-1951 został odnowiony przez ojców oblatów, którzy spełniali przy nim posługi religijne. Od roku 1951 proboszczami kościoła są ojcowie oblaci.

W roku 1985 nastąpiła zmiana wystroju prezbiterium świątyni a w 2003 roku kościół ponownie rozbudowano do powierzchni 233m² oraz 2630m³ objętości. Przebudowa powiększyła wnętrze kościoła o nowy ołtarz i dwie nawy boczne. Zyskano dodatkową przestrzeń, w której znajdują się konfesjonały, pomieszczenia na potrzeby socjalne oraz pomieszczenia w piwnicach pozwalające na pozaliturgiczne życie parafii. W 2004 roku na zewnątrz wybudowana została dzwonnica.



Rys.1. Wizualizacja projektowanego kościoła.
Fig.1. View of the church.

Nad głównym wejściem do świątyni znajduje się, oparte na drewnianych słupach, miejsce dla chóru. Nawę główną stanowi stara część obiektu. Ma ona kształt prostokąta o długości 27,65m. Po obu stronach znajdują się rzędy ławek. Na przedłużeniu nawy głównej wybudowano prezbiterium z półkolistą absydą a po bokach znajdują się dwie nawy boczne wyposażone w ławki. Nawy boczne tworzą w rzucie kształt krzyża i zapewniają wiernym dobry kontakt wzrokowy i słuchowy z kapłanem.

Prezbiterium znajduje się na owalnym podwyższeniu wykonanym z drewna. Tu umieszczony jest ołtarz, kazalnica, pulpit słowa bożego oraz pulpit przewodniczenia. Kościół oświetlony jest głównie światłem sztucznym. Dodatkowy nastrój wprowadzają witraże umieszczone w nawach bocznych.

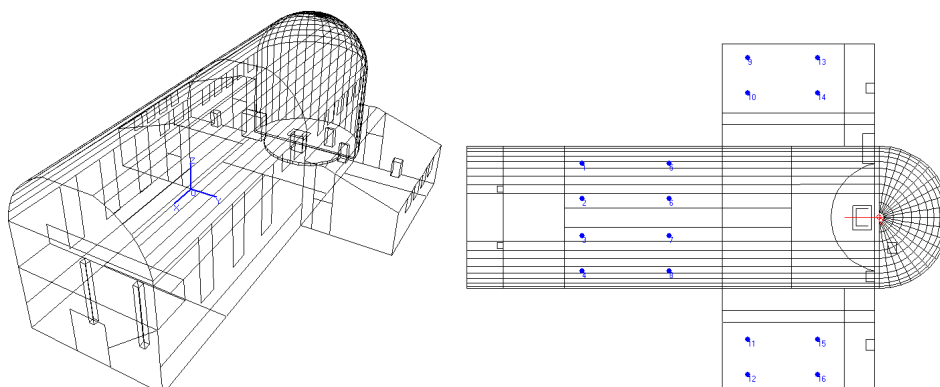
Architektura świątyni w Grotnikach jest przykładem obiektu sakralnego małego czyli kościoła intymnego [5].

Przeważającą powierzchnię w kościele stanowi kamień, szkło i tynk. Są to materiały o niskim współczynniku pochłaniania dźwięku i właściwościach odbijających. Akustykę obiektu w niewielkim stopniu poprawiają drewniane ławki i dywanowe wykładziny.

4. DOPASOWANIE CZASU POGŁOSU DO WARTOŚCI OPTYMALNYCH

W obliczeniach wykorzystano komputerowy model pola akustycznego, oparty na zmodyfikowanej metodzie promieniowej, przy użyciu którego obliczono parametry opisujące charakter akustyki pomieszczenia [3]. Wnętrze kościoła zostało zamodelowane jako trójwymiarowa bryła przez 388 powierzchni. Całkowita powierzchnia wynosiła około 1346m². Model obliczeniowy przedstawiono na Rys.2. Jako źródła dźwięku przyjęto głośno mówiącą osobę usytuowaną w prezbiterium lub chór usytuowany w miejscu dla chóru. Punkty odbioru usytuowano w miejscach przewidzianych dla wiernych. 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. Obliczenia parametrów akustycznych kościoła przeprowadzono dla temperatury 20°C, wilgotności względnej powietrza 50%. Przyjęto moduł siatki przestrzennej 0,5m x 0,5m.



Rys.2. Model obliczeniowy projektowanego kościoła oraz rozmieszczenie punktów odbioru.
Fig.2. View (interior plan) of the church with marked receiver points.

W pierwszej kolejności wykonano obliczenia podstawowych parametrów dla materiałów istniejących. Wartości współczynnika pochłaniania dźwięku dla tych materiałów podano w Tabeli 1.

Tabela 1. Współczynniki pochłaniania materiałów przyjętych do symulacji.
Table 1. Absorption coefficient of the material.

Materiał	Współczynnik pochłaniania w zakresie częstotliwości							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Tynk c-w	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05
Szkło	0,08	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
Drzwi dREW.	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Płytki ceram.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Dywan	0,02	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65	0,65
Ławki dREW.	0,10	0,10	0,15	0,30	0,44	0,45	0,46	0,46

Następnie poszukiwano rozwiązania materiałowego zapewniającego optymalne wartości parametrów akustycznych wnętrza w zależności od funkcji, jaką ma ono pełnić. W przypadku małych kościołów zalecane jest wyłożenie prezbiterium i sufitu materiałami rozpraszającymi dźwięk, natomiast podłogi oraz ścian materiałami pochłaniającymi dźwięk tak, aby uzyskać rozproszone pole akustyczne w całej przestrzeni wnętrza kościoła zarówno w nawie głównej jak i w nawach bocznych lub kaplicach.

Przyjęte materiały miałyby zapewnić zalecane wartości czasu pogłosu oraz czasu wczesnego zaniku dla mowy oraz dla muzyki, a ich rozmieszczenie powinno spełniać powyższe zalecenia. Wybrano hipotetyczny materiał, który zapewniał uzyskanie czasu pogłosu o stałej wartości w dziedzinie częstotliwości, co stanowi wartości optymalne dla mowy. W przypadku muzyki czas pogłosu powinien mieć wyższe wartości, a na częstotliwości 125Hz pożądany jest wzrost czasu pogłosu do 50% w odniesieniu do częstotliwości średnich. Takie wartości miałyby zapewnić drugi z poszukiwanych materiałów.

Materiały zapewniające uzyskanie optymalne czasy pogłosu przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Współczynniki pochłaniania materiałów zapewniających optymalne wartości czasu pogłosu.

Table 2. Absorption coefficient of the surface materials to obtained optimal values of Reverberation Time.

Materiał	Współczynnik pochłaniania w zakresie częstotliwości							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Optymalny czas pogłosu dla mowy	0,95	0,95	0,95	0,90	0,75	0,65	0,45	0,01
Optymalny czas pogłosu dla muzyki	0,10	0,12	0,22	0,25	0,12	0,05	0,05	0,01

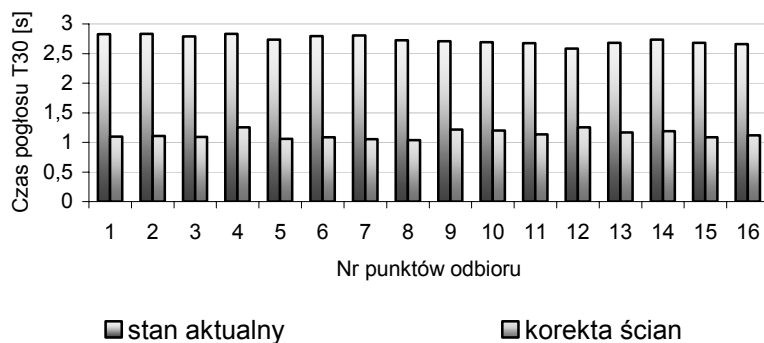
5. WPLYW POGŁOSOWOŚCI NA WYBRANE PARAMETRY AKUSTYCZNE

Po znalezieniu charakterystyk współczynnika pochłaniania dźwięku w funkcji częstotliwości dla materiałów zapewniających optymalne wartości czasu pogłosu dla mowy i muzyki przeanalizowano wpływ parametrów związanych z pogłosowością na inne, wybrane parametry akustyczne charakteryzujące subiektywnie odczuwaną akustykę pomieszczenia. Wybrano dwa parametry dla oceny walorów brzmieniowych muzyki oraz dwa określające zrozumiałość mowy. Ponieważ w kościele ważna jest zarówno mowa jak i muzyka, parametry charakteryzujące wyrazistość mają istotne znaczenie w kształtowaniu akustyki wnętrza. Wnętrza małe, o małej pogłosowości, sprzyjają dobrej zrozumiałości mowy. Dlatego przy kształtowaniu akustyki świątyń można z powodzeniem wykorzystać definicję D_{50} oraz współczynnik zrozumiałości mowy STI, przyjmując wartości optymalne zbliżone do tych, jakie charakteryzują wnętrza teatralne. W kościołach, gdzie dominuje muzyka chóru i organów użyteczne są czasowy środek ciężkości t_s i wyrazistość C_{80} . Akustykę takich wnętrz należy kształtować zmierzając do uzyskania wartości charakteryzujących pomieszczenia do odsłuchu muzyki symfonicznej i organowej. Rozpatrywany kościół, ze względu na kubaturę, zaliczono do grupy kościołów intymnych, dla których optymalne wartości parametrów akustycznych kształtują się następująco:

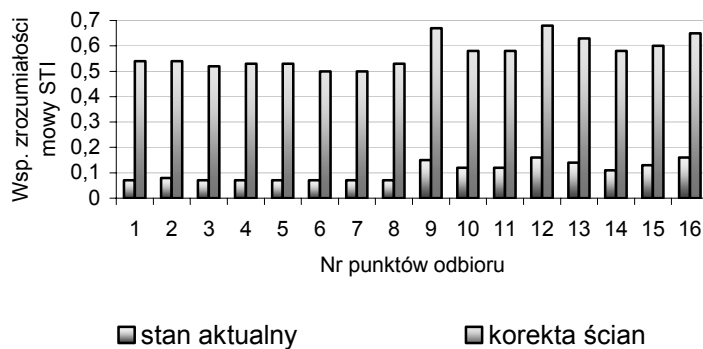
- współczynnik zrozumiałości mowy (bez systemów nagłaśniających) STI > 0,6
- definicja $D_{50} > 0,34$
- wyrazistość C_{80} od -5,0dB do 3,0dB
- czasowy środek ciężkości t_s od 100ms do 180ms

6. WYNIKI ANALIZ

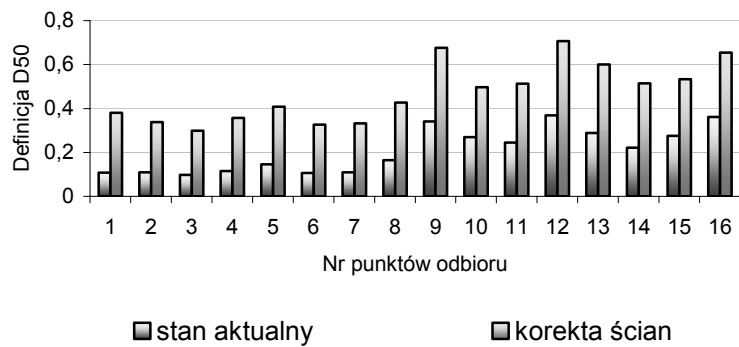
Wyniki analizy komputerowej dla poszczególnych parametrów przedstawiono na Rys.3 – 8. Zamieszczone wartości czasu pogłosu, D_{50} , C_{80} i t_s , są wartościami średnimi dla poszczególnych punktów odbioru w zakresie częstotliwości 125 – 4000 Hz.



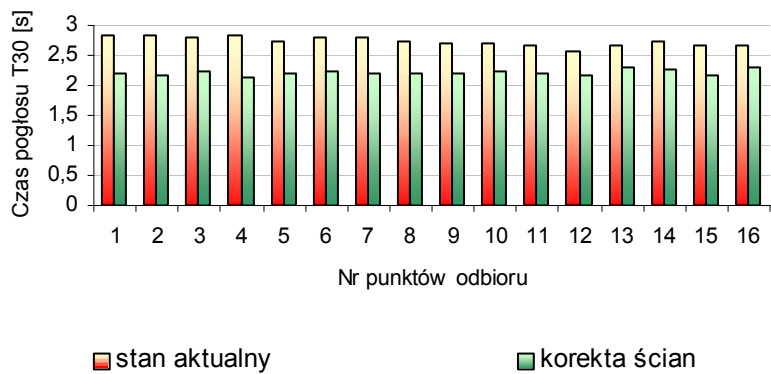
Rys.3. Wartości czasu pogłosu w punktach odbioru dla produkcji słownej.
Fig.3. Reverberation Time for individual receiver points for speech.



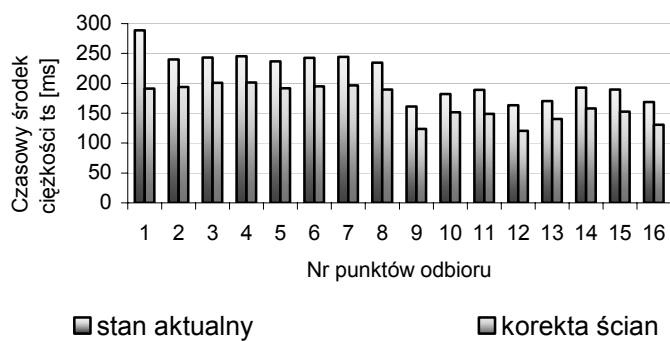
Rys.4. Wartości STI w punktach odbioru dla produkcji słownej.
Fig.4. Speech Transmission Index for individual receiver points for speech.



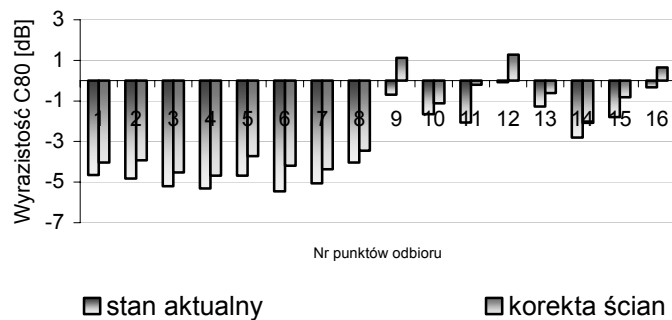
Rys.5. Średnie wartości D_{50} dla produkcji słownej.
 Fig.5. Mean values of Definition for individual receiver points for speech.



Rys.6. Wartości czasu pogłosu dla produkcji muzycznej.
 Fig.6. Reverberation Time for individual receiver points for music.



Rys.5. Średnie wartości t_s dla produkcji muzycznej.
 Fig.5. Mean values of Centre Time for individual receiver points for music.



Rys.7. Średnie wartości C_{80} dla produkcji muzycznej.
 Fig.7. Mean values of Clarity for individual receiver points for music.

7. UWAGI KOŃCOWE

Wyniki symulacji komputerowej przeprowadzono w celu dopasowania czasu pogłosu dla odbioru mowy i muzyki do wartości optymalnych a następnie sprawdzenie, jaki to ma wpływ na inne atrybuty akustyczne pomieszczenia. Po przeprowadzeniu symulacji komputerowych stwierdzono, że:

1. Odpowiednie charakterystyki czasu pogłosu w funkcji częstotliwości można uzyskać poprzez zmianę rozwiązań materiałowych pomieszczenia.
2. Współczynniki pochłaniania materiałów zapewniających optymalne wartości czasu pogłosu są możliwe do określenia, ale materiał rzeczywisty mający taką charakterystykę jest dość trudny do dobrania.
3. Uzyskanie wymaganej charakterystyki czasu pogłosu stwarza sytuację, w której mowa ludzka będzie słyszana w sposób zadowalający we wszystkich miejscach w kościele oraz muzyka będzie miała odpowiedni odbiór.
4. Zapewnienie odpowiedniej pogłosowości pomieszczenia prowadzi do tego, że wybrane parametry akustyczne charakteryzujące subiektywnie odczuwaną akustykę pomieszczenia również przyjmują wartości bliskie optymalnym.
5. W przypadku zbyt małego rozproszenia dźwięku stan ten można poprawić dzięki wyeksponowaniu przestrzennych elementów konstrukcyjnych oraz wprowadzeniu tradycyjnych elementów wystroju kościoła (rzeźba, płaskorzeźba itd.) na płaskich powierzchniach lub nadaniu powierzchniom głębokiej faktury.
6. W celu uniknięcia wyraźnej zmiany parametrów akustycznych dla pomieszczenia wypełnionego ludźmi i pustego korzystne jest zastąpienie ławek drewnianych ławkami o siedziskach miękkich (współczynnik pochłaniania dźwięku ławek pustych wyściełanych i ławek wypełnionych ludźmi różni się niewiele).

W wielu obecnie realizowanych obiektach sakralnych pomieszczenia wykazują zbyt dużą pogłosowość oraz słabe rozproszenia dźwięku. Obliczanie czasu pogłosu na etapie projektowym w zupełności wystarcza do wstępnych wniosków odnośnie spodziewanych

właściwości akustycznych pomieszczenia. Możliwym jest zaproponowanie materiałów poprawiających własności akustyczne kościoła, bez naruszania geometrii bryły. Zastosowanie tych materiałów wpływa na znaczną poprawę pozostałych parametrów akustycznych. Potwierdza to zatem celowość wykonywania opracowań w zakresie akustyki wnętrz na etapie projektowym.

8. LITERATURA

- [1] Bradley J.,S., Auditorium acoustics measurements from pistol shots JASA 80 (1), July 1986.
- [2] Jordan V.J., A group of objective acoustical criteria for concert halls, Applied Acoustics, 14/1981
- [3] ODEON Room Acoustics Program. Version 5.0. User Manual. Industrial, Auditorium and Combined Editions. 2001
- [4] Sabine W.C., Collected Papers on Acoustics. Harvard University Press, Cambridge, 1922BARRON M.: Auditorium acoustics and architectural design. E&FN Spon. Londyn 1998.
- [5] WRÓBLEWSKA D.: Akustyka w architekturze współczesnych kościołów rzymskokatolickich. Praca doktorska. Politechnika Gdańska. Gdańsk 2000.



Dr inż. Marek JABŁOŃSKI
Adiunkt w Katedrze Fizyki Budowli
i Materiałów Budowlanych
Politechniki Łódzkiej
Zainteresowania:
akustyka budowlana, akustyka pomieszczeń, fizyka miasta,
sztuczne sieci neuronowe.
e-mail: marojabl@p.lodz.pl



Justyna MARCINIĄK
Dyplomant w Katedrze Fizyki Budowli
i Materiałów Budowlanych
Politechniki Łódzkiej
Zakres zainteresowań:
akustyka architektoniczna, akustyka budowlana
e-mail: j.marciniak@op.pl