

MODELE TEORETYCZNE CZASU POGŁOSU W ANALIZIE POMIESZCZEŃ AUDYTORYJNYCH

Marcelina OLECHOWSKA, Artur NOWOŚWIAT*

* Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: marcelina.olechowska@polsl.pl, artur.nowoswiat@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analiz teoretycznych czasu pogłosu w wybranych trzech aulach. Na podstawie tych analiz wyznaczono różnice pomiędzy stosowanymi modelami a pomiarem w warunkach rzeczywistych. Wyznaczone różnice posłużą do opracowania nowej metody szacowania czasu pogłosu.

Słowa kluczowe: Czas pogłosu, model Sabine'a, analiza reszt.

1. WPROWADZENIE

W ogólnie dostępnych materiałach dotyczących akustyki pomieszczeń sprawdzano przydatność modeli teoretycznych czasu pogłosu oraz porównywano nowe metody z wartościami otrzymanymi według najczęściej stosowanych formuł: Sabine'a, Eyringa, czy Fitzroya. Publikacje światowe można podzielić na następujące grupy: grupa I – artykuły wprowadzające nowe formuły do predykcji czasu pogłosu [10], [15], [16], [20]; grupa II – przedstawiająca podejście do wyznaczania czasu pogłosu za pomocą perturbacji, sieci neuronowych, MES oraz ogólnie różnych metod numerycznych: [1], [3], [12], [14], [17], [18]; grupa III analizująca zastosowanie formuł klasycznych do wnętrza o skomplikowanym kształcie [8], [9], [11], [19]; grupa IV przedstawia wyniki swoich badań przy zastosowaniu współczynników pochłaniania wyznaczonych ze wzoru Sabine'a [4], [7], [13]; w grupie V analizowano wpływ wypełnienia wnętrza publicznością a także badano wpływ nierównomiernego rozkładu absorpcji [1], [2], [5], [6]. Badania tych badaczy zainspirowały autorów niniejszego artykułu do wykorzystania znanych wyników i metod w celu opracowania nowej metody na tych metodach bazującej.

2. BADANIA

Przedmiotem badań były trzy aule. Wykończenia wewnętrzne ścian i sufitów wykonane jako tynki cementowo-wapienne, są pokryte farbą. Posadzka wykonana jest z lastryka. Stropy w aulach wykonane są jako płytowo-belkowe oparte na ustroju ramowym. Ściany osłonowe murowane prawdopodobnie z pustaków. Aule posiadają amfiteatralny układ miejsc siedzących dla słuchaczy (ławki drewniane). Kubatury badanych pomieszczeń wynoszą kolejno 300 m³, 840 m³, 423 m³.

Wiadomym jest iż przebieg charakterystyki czasu pogłosu w funkcji częstotliwości zależy od geometrii układu oraz rodzaju zastosowanych materiałów i ustrojów dźwiękochłonnych.

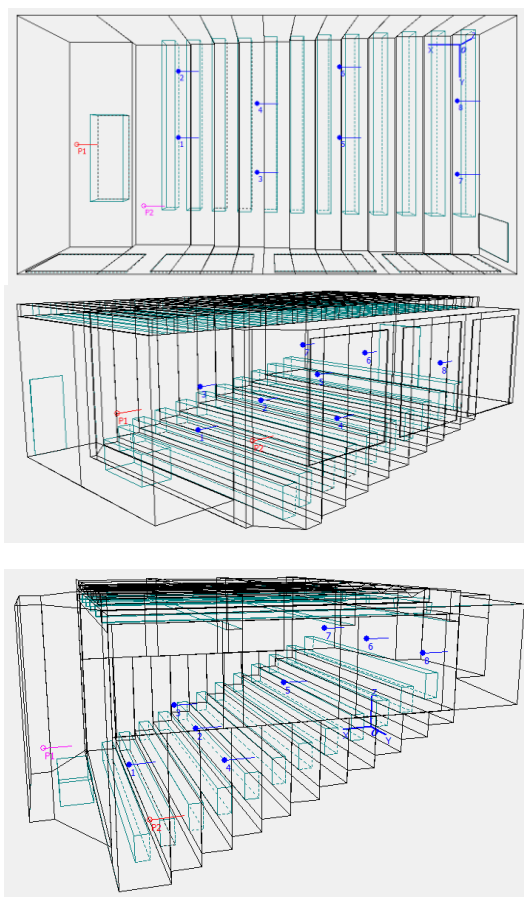
Na podstawie badań i literatury stwierdzono, że czas pogłosu zależy od punktu obserwacji. Zazwyczaj podawana jest wartość średnia z kilku wartości zmierzonych w różnych punktach obserwacji. A najlepiej jak jeszcze rozważyć różne położenia źródła dźwięku.

Liczbę punktów pomiarowych w pomieszczeniu ustala się tak, aby uzyskać odpowiednie pokrycie całego pomieszczenia. Punkty pomiarowe powinny być oddalone od siebie o co najmniej pół długości fali akustycznej. W przypadku typowego zakresu pomiarowego minimalna odległość punktów wynosi około 2 m. Odległość mikrofonu od powierzchni ograniczającej pomieszczenie powinna wynosić co najmniej ćwierć długości fali, czyli około 1 m. Minimalną odległość d_{min} pomiędzy punktem pomiarowym i źródłem dźwięku oblicza się ze wzoru

$$d_{min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}}$$

przy czym przez V – rozumiemy objętość pomieszczenia, c – prędkość dźwięku, a przez T – szacunkową spodziewaną wartość czasu pogłosu.

W przypadku badań opisanych w tym artykule punkty pomiarowe umieszczono w rzędach ławek na wysokości 1,2 m od podłogi pomieszczenia, natomiast wszechkierunkowe źródło dźwięku na wysokości 1,5 m. Przyjęto dwie pozycje źródła dźwięku $P1$ i $P2$. Pozycja $P1$ odpowiada usytuowaniu źródła dźwięku przy katedrze, pozycja $P2$ w lewym narożniku auli. Badania akustyczne przeprowadzono dla wnętrza niezapełnionego słuchaczami. Pomiary przeprowadzono w 8 punktach pomiarowych zlokalizowanych w badanym wnętrzu. Rozmieszczenie punktów pomiarowych, a także pozycje źródła dźwięku i wnętrze auli przedstawiają rysunki 1.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych i źródła dźwięku w badanych aulach.

Fig. 1. Layout scheme of measurement points and sound sources in tested auditoriums.

Badania przeprowadzono za pomocą pomiaru, symulacji ODEON, wzorów teoretycznych.

- a) Pomiar – wykonano aparaturą spełniającą wszelkie wymagania metrologiczne dla przyrządów klasy dokładności 1. Układ pomiarowy składał się z toru nadawczego i odbiorczego.

Część nadawcza układu obejmowała następujące elementy:

- Kolumna głośnikowa o kulistej charakterystyce promieniowania,
- Generator szumu różowego i białego wraz ze wzmacniaczem,

Część odbiorcza układu obejmowała następujące elementy:

- Analizator akustyczny,
- Mikrofony,
- Przedwzmacniacz,
- Kalibrator akustyczny
- Komputer z oprogramowaniem pozwalającym czytywanie i obróbkę wyników.

Pomiary czasu pogłosu wykonano przy użyciu metody szumu przerywanego. Zastosowano pobudzenie wnętrza za pomocą szerokopasmowego szumu ukształtowanego tak, aby uzyskać w przybliżeniu różowe widmo dźwięku pogłosowego w stanie ustalonym dla zakresu obejmującego pasma 1/3-oktawowe o częstotliwościach środkowych 50 – 5000 Hz. Źródło dźwięku wytwarzało poziom ciśnienia akustycznego wystarczający do tego, aby krzywa zaniku rozpoczynała się przynajmniej 35 dB powyżej tła akustycznego w odpowiednim zakresie częstotliwości. Celem uzyskania wysokiej dokładności wyników i zminimalizowania wpływu losowości sygnału pobudzającego powtórzono czterokrotnie pomiar w każdym punkcie. Wartości uzyskanych czasów pogłosu uśredniono stosując regułę trzech sigm.

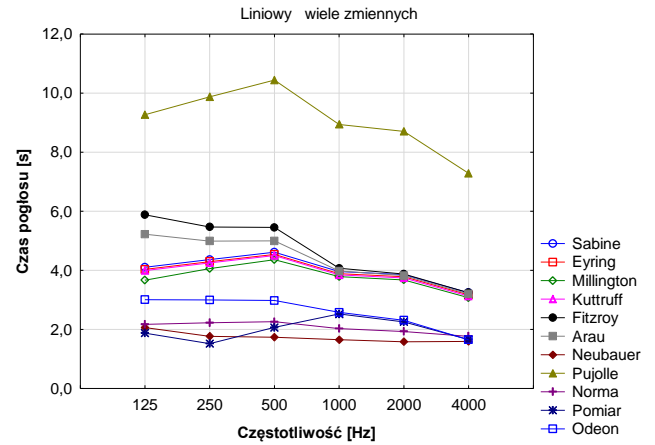
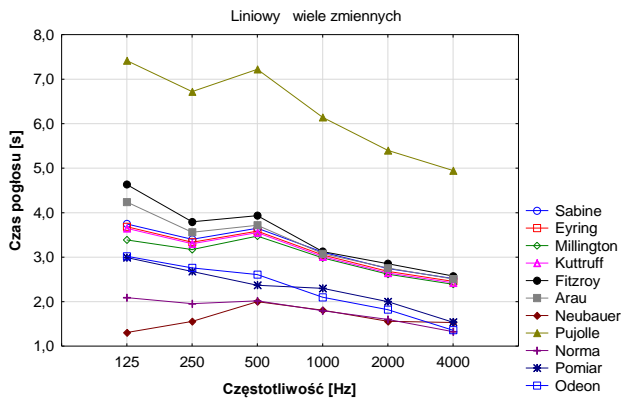
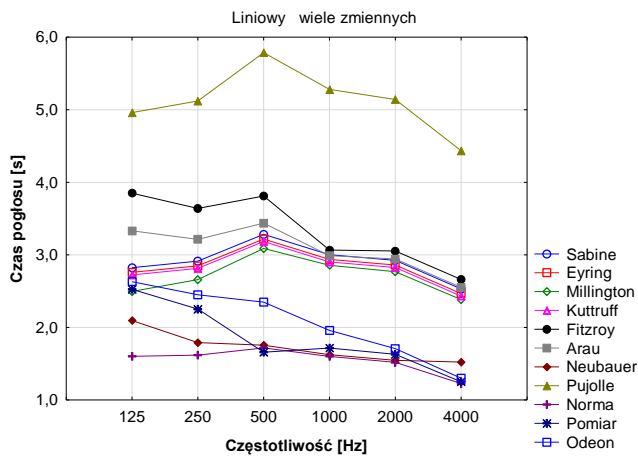
- b) Symulacje ODEON – Program ODEON podobnie jak pomiar pozwala wyznaczyć czas pogłosu w każdym zadanym punkcie pomieszczenia. Jest to możliwe dzięki możliwości szacowania krzywej zaniku dźwięku. Wirtualne fale są wysyłane ze źródła w losowych kierunkach. Na skutek absorpcji dźwięku przez przegrody ograniczające pomieszczenie maleje energia tychże wysłanych fal, która jest rejestrowana przez program. Na podstawie dużej liczby fal obliczana jest globalna energetyczna krzywa zaniku dźwięku.

Pozycje wirtualnego źródła dźwięku oraz wirtualnych odbiorników przyjęto podobnie jak ich rzeczywistych odpowiedników podczas pomiarów.

- c) Wzory teoretyczna – do obliczeń przyjęto znane w akustyce wnętrz modele: Sabine’a, Eyringa, Millingtona, Kuttruffa, Fitzroya, Arau, Neubaera, Pujolle, wzór normowy.

3. WYNIKI

Dla wszystkich stanowisk badawczych (I) – (III) wyznaczono czas pogłosu za pomocą wzorów, pomiarów i symulacji akustycznych. Następnie porównano uzyskane wartości czasów pogłosu różnymi metodami (Sabine’a, Eyringa, Millingtona, Kuttruffa, Arau, Neubauera, Pujolle’a i zaleceniami normy, a także symulacją akustyczną) z pomiarem. Obliczenia wykonano przy użyciu klasycznych modeli do predykcji czasu pogłosu. Wyniki czasu pogłosu w aulach przedstawiono na poniższych wykresach:



Rys. 2. Charakterystyki czasu pogłosu uzyskane różnymi metodami. Wyniki przedstawione kolejno odpowiadają aulom I, II, III.

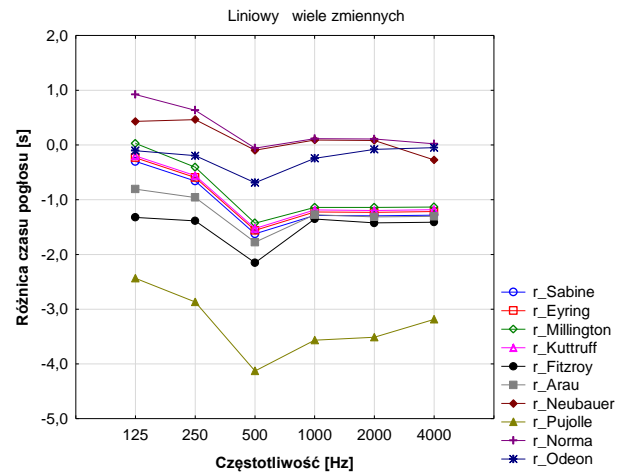
Fig. 2. Characteristics of the reverberation time obtained by different methods. The results presented consecutively correspond to auditoriums I, II, III.

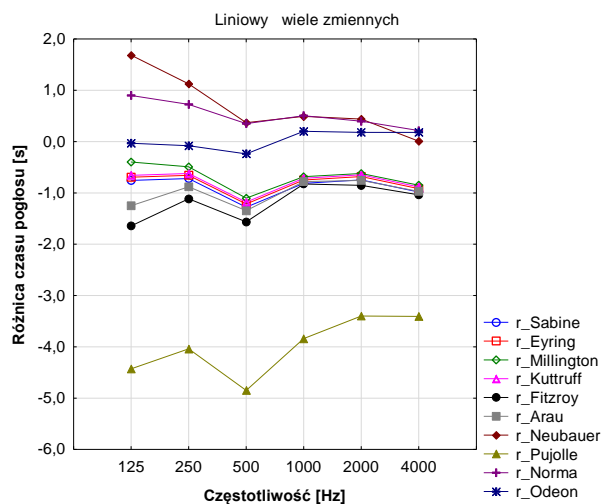
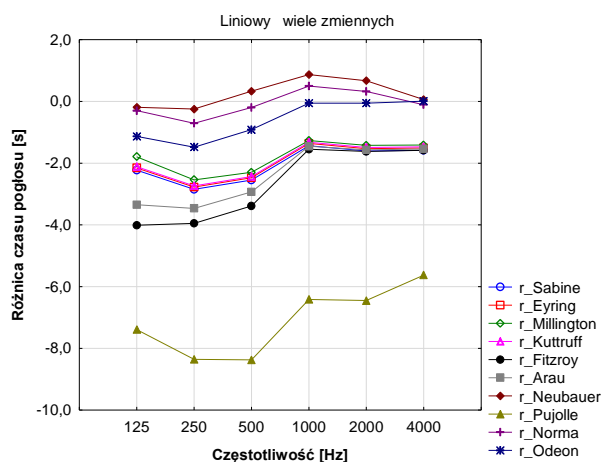
W celu dalszych analiz zdefiniowano odchylenie wyników otrzymanych za pomocą wzorów teoretycznych od wyników pomiarów i odchylenie to nazwano resztą. Reszta zdefiniowana jest jako

$$R = T_p - T_m \quad (1)$$

gdzie T_p – jest czasem pogłosu uzyskanym z pomiaru
 T_m – jest czasem pogłosu uzyskanym z metody teoretycznej.

Wyniki przebiegów reszt przedstawiono poniżej





Rys. 3. Charakterystyki reszt. Wyniki przedstawione kolejno odpowiadają aulom I, II, III.

Fig. 3. Characteristics of residues. The results presented consecutively correspond to auditoriums I, II, III.

4. WYNIKI BADAŃ I Dyskusja

Na podstawie otrzymanych wyników (rysunek 2) można stwierdzić, że formuła Pujolle’a jest nieodpowiednia dla badanych wnętrz typu aula. Wykresy wykazują pewną tendencję w częstotliwości 500 Hz (pik w dół „wartość z pomiaru”, a w górę „wartość z metod”). Zaobserwowano, że uzyskane wartości z metod wyznaczania czasu pogłosu podzieliły się na dwie grupy: pierwszą tworzą wzór Neubauera i normy, Odeon oraz pomiar, a drugą — pozostałe formuły.

Analiza reszt (rysunek 3) dla pierwszego pomieszczenia, otrzymana z różnicy pomiędzy pomiarem a modelem obliczeniowym dowodzi, że porównywalne wartości z pomiarem uzyskano dla częstotliwości:

- 125 Hz — z formuły Millingtona,
- 250 Hz — z symulacji komputerowej,
- 500 Hz — z wzoru normowego,
- 1 kHz — z formuły Neubauera,
- 2 kHz — z formuły Neubauera oraz symulacji komputerowej,
- 4kHz — z wzoru normowego.

Analiza reszt (rysunek 3), dla drugiego pomieszczenia wykazała, że porównywalne z pomiarem wartości uzyskano dla częstotliwości:

- 125 – 2000 Hz — z symulacji komputerowej,
- 4 kHz — z formuły Neubauera.

Analiza reszt (rysunek 3), dla trzeciego pomieszczenia, wykazała, że wartości porównywalne z pomiarem uzyskano dla częstotliwości:

- 125 – 250 Hz — z formuły Neubauera
- 500 Hz — z wzoru normowego,
- 1 – 4 kHz — z symulacji komputerowej.

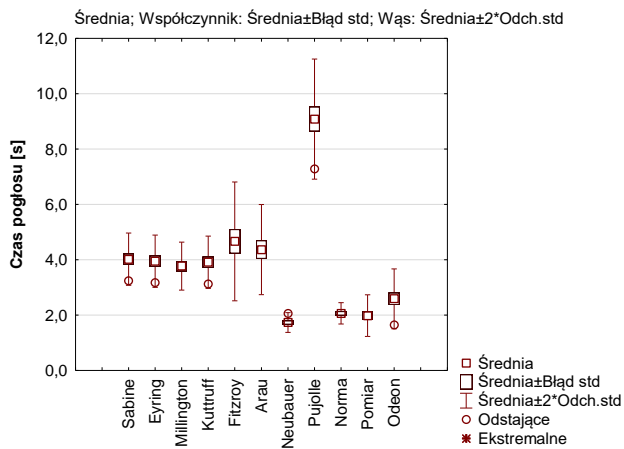
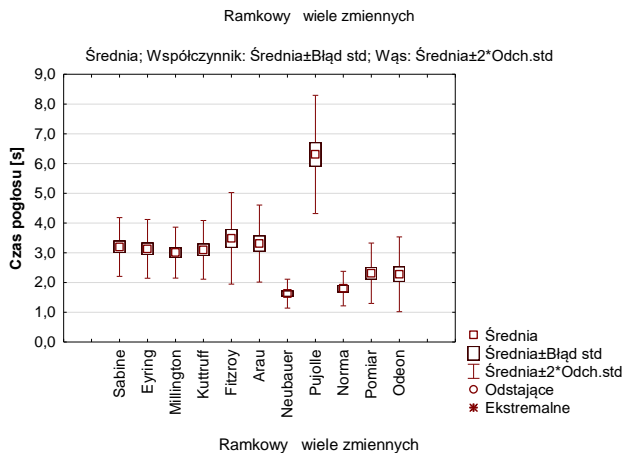
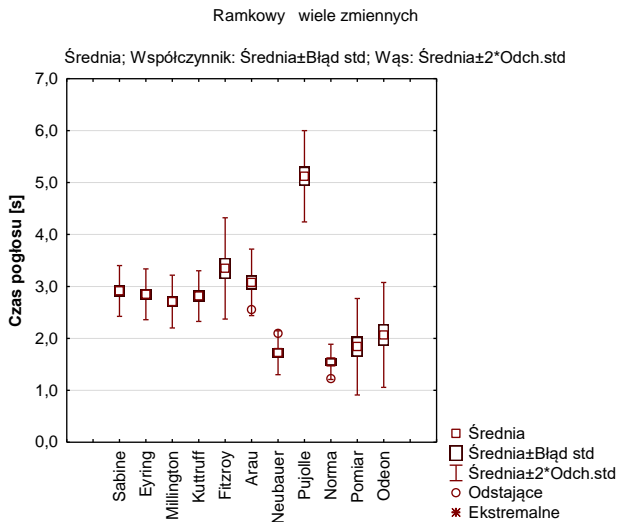
Z powyższych analiz przyjęto dwie grupy wniosków.

1. Pierwsza grupa mówi o przydatności konkretnych wzorów teoretycznych do szacowania czasu pogłosu w pomieszczeniach typu aula.
2. Druga grupa wniosków doprowadziła do opracowania nowej metody szacowania czasu pogłosu, nazwaną „Metoda Minimalizacji Reszt MMR”.

W artykule tym nie będziemy zajmować się drugą grupą wniosków, gdyż stanowi ona opracowany artykuł będący obecnie w recenzji w renomowanym czasopiśmie naukowym.

Natomiast zajmując się pierwszą grupą można na podstawie przedstawionych wyników przypuszczać, że metody Neubauera, normowa oraz symulacje w ODEON dają najlepsze oszacowanie czasu pogłosu dla pomieszczeń typu aula. Dla potwierdzenia tego przypuszczenia przeprowadzono analizę wartości średnich czasu pogłosu ze wszystkich częstotliwości środkowych. Co prawda taka średnia wartość nie odzwierciedla rzeczywistego czasu pogłosu, jednakże cel takiego uśrednienia jest inny. Mianowicie pokazanie zróżnicowania rozkładu czasu pogłosu.

W tym celu wykonano wykresy typu ramka wąsy:



Rys. 4. Wykresy ramka wąsy. Wyniki przedstawione kolejno odpowiadają aulom I, II, III.

Fig. 4. Diagrams of mustache frame. The results presented consecutively correspond to auditoriums I, II, III.

Jak można zauważyć wynik dla metody Pujolle zdecydowanie przeszacowuje wartość rzeczywistą. Wyniki metodą Neubauera, normą i ODEON odzwierciedlają

wynik pomiaru, a pozostałe metody tworzą grupę jednakowych wyników przeszacowujących w jednakowy sposób wynik rzeczywisty.

Wyniki przedstawione graficznie na rysunku 4. potwierdzoną za pomocą testowania hipotez.

$$H_0 : \mu_m = \mu_p$$

$$H_1 : \mu_m \neq \mu_p$$

Za pomocą testu dla prób niezależnych uzyskano wnioszek, iż dla średnich wartości Neubaera, normy i ODEON w porównaniu ze średnią wartością pomiaru, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 . Dla pozostałych metod sprawdzaną hipotezę odrzucamy.

THEORETICAL MODELS OF REVERBERATION TIME IN THE ANALYSIS OF AUDITORIUM PREMISES

Summary: The paper presents the results of theoretical analysis of the reverberation time in three selected auditoriums. Based on the analysis the differences between the models used and measurements in real conditions were determined. Designated differences will be used to develop new methods for estimating the reverberation time.

Literatura

- [1] Arau-Puchades. H.: *An Improved Reverberation Formula*. *Acustica*. 1988, vol. 65, p. 163 – 180.
- [2] Astolfi A., i inni: *Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms*. *Ap. Acoust.*. 2008, 69, p. 966 – 976.
- [3] Batko W., Pawlik P.: *Uncertainty Evaluation in Modelling of Acoustic Phenomena with Uncertain Parameters Using Interval Arithmetic*. *ACTA Physica Polonic A*. 2012, vol. 121, No. 1-A, p. 152 – 155 A.
- [4] Beranek L.L.: *Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption*. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2006, 120 (3), p. 1399 – 1410.
- [5] Bradley J.S.: *Optimising sound quality for classrooms*. *Proceedings of XX Meeting of SOBRAC (Brazilian Acoustical Association)*. 2002, p. 1 – 15.
- [6] Carvalho A.: *The use of the Sabine and Eyring reverberation time equation to churches*. 129th meeting of the Acoustical Society of America. 1995.
- [7] Dance S.M., Shield B.M.: *Modeling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces. Part II. Absorptive panels*. *Applied Acoustics*. 2000, 61, p. 373 – 384.
- [8] Gerretsen E.: *Estimation Methods for Sound Levels and Reverberation Time in a Room with Irregular Shape or Absorption Distribution*. *ACTA Acustica United With Acustica*. 2006, vol. 92, p. 797 – 806.

- [9] Iordache V. i inni: *Experimental Investigation of the Reverberation Time Inside a Complex Geometry Indoor Space*. Romanian J. of Ac. and Vib., 2013, vol. X issue 2, p. 109 – 114.
- [10] Kang J., Neubauer R.O.: *Predicting reverberation time: Comparison between analytic formulae and computer simulation*. Proceedings of the 17th International Conference on Acoustics (ICA). 2001.
- [11] Kang J. i inni, *Acoustics in large atrium spaces*. 14th International Congress on Sound and Vibration. 2007
- [12] Kraszewski J.: *Computing Reverberation Time in a 3D Room Model Using a Finite Difference Method Applied for the Diffusion Equation*. Archives of Acoustics. 2012, vol. 37, No. 2, p. 171 – 180.
- [13] Lawrence T.: *The Effect of Partially Diffuse Sound Fields on the Prediction of Absorption Coefficients*. MSc Audio Acoustics Dissertation. 2006.
- [14] Lehmann i inni: *Reverberation-Time prediction method for room impulse responses simulated with the image-source model*. IEEE Workshop on Appl. of Sig. Proc. to Audio and Acoustics. 2007, p. 159 – 162.
- [15] Neubauer R.O., Kostek B.: *Prediction of the Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non-Uniformly Distributed Sound Absorption*. Archives of Acoustics. 2000, vol. 26, No. 3, p. 183 – 201.
- [16] Pujolle J.: *Nouvelle formule pour la durée de réverbération*, Rev. d'Acoust. 1975, 19, p. 107 – 113.
- [17] Skrzypczyk J.: *Metody perturbacyjne. I Nowa metodologia algebraiczna. Zastosowania w mechanice i akustyce*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010. ISBN978-83-7335-720-4.
- [18] Spargo D., Martens W.L., Cabrera D.: *Comparison of Room Acoustic Measurements of Diffuseness with a Theoretical Model*. Proceedings of Acoustics. 2011, p.1 – 5.
- [19] Yasuda Y. i inni: *Experimental and numerical studies on reverberation characteristics in a rectangular room with unevenly distributed absorbers*. Acoustical Science and Technology. 2006, 27, 6, p. 366 – 374.
- [20] Zhang Y.A.: *Method to Predict Reverberation Time in Concert Hall Preliminary Design Stage*. A Dissertation. Georgia 2005.