

PRZEWIDYWANY CZAS POGŁOSU W SALACH DYDAKTYCZNYCH

Artur NOWOŚWIAT*, Marcelina OLECHOWSKA, Bartłomiej PUDEŁKO, Rafał ŻUCHOWSKI

¹Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice,

email: artur.nowoswiat, marcelina.olechowska, bartlomiej.pudelko, rafal.zuchowski}@polsl.pl

Streszczenie: Artykuł dotyczy przewidywanego czasu pogłosu za pomocą znanych modeli teoretycznych. Wykonano pomiary czasu pogłosu w ośmiu salach dydaktycznych Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Następnie przeprowadzono obliczenia czasu pogłosu za pomocą znanych formuł teoretycznych. Wyniki obliczeń teoretycznych porównano z wynikami pomiarów i określono najlepszy model szacujący czas pogłosu dla przedstawionych pomieszczeń. Ponadto dokonano oceny badanych pomieszczeń ze względu na zrozumiałość dźwięku słownego. Analizowane pomieszczenia były podzielone ze względu na kubaturę na dwie grupy. W pierwszej grupie znajdowały się cztery pomieszczenia o średniej kubaturze 190,8 m³, natomiast w drugiej również cztery pomieszczenia, ale o kubaturze 258,5 m³. Pomiary realizowano w pustym pomieszczeniu przy użyciu metody szumu przerywanego. Tak przedstawione wyniki posłużą do wielokryterialnej oceny pomieszczeń szkolnych oraz do określenia współczynnika korygującego model Sabine'a dla tego typu pomieszczeń.

Słowa kluczowe: Czas pogłosu, wskaźnik transmisji mowy, pomieszczenia dydaktyczne

1. WPROWADZENIE

W ciągu ostatnich 50 lat, jak pisze Campbell [5] świadomość znaczenia akustyki w klasach szkolnych stale rosła. Jednym z najważniejszych parametrów akustyki pomieszczeń dydaktycznych jest czas pogłosu. Wagę problemu czasu pogłosu w takich pomieszczeniach opisał już Bistafa i Bradley [3], którzy symulowali komputerowo klasy szkolne i zmieniając parametry pochłaniania dźwięku porównywali wyniki eksperymentalne z analitycznymi i komputerowymi. Jednakże już przed nimi powstawały prace, np. Hodgsona [10], w której po przebadaniu kilkudziesięciu klas szkolnych stwierdził w nich nadmierny pogłos. Zresztą Bradley na tyle był zaintrygowany akustyką klas szkolnych, że opublikował kolejną pracę dotyczącą wyników pomiarów akustycznych i pomiarów zrozumiałości mowy w 12 różnych szkołach [4].

Badaniom poddawany również był wpływ uczniów w klasie na warunki pogłosowe [6] i stwierdzono, że zależy on od właściwości pogłosowych pustego pomieszczenia.

Problem nadmiernego pogłosu klas szkolnych występuję na całym świecie, co potwierdzają badania [16]. Bardzo ciekawe badania stosunku sygnału do szumu i czasu pogłosu były prowadzone i odniesione do ciepłego klimatu tropikalnego [11]. Innym podejściem do projektowania klas szkolnych jest zastosowanie metod wielokryterialnych, np. AHP do poprawy zrozumiałości mowy. Takie podejście zastosował Madbouly z zespołem [15], którzy dla efektywności uczenia się zastosowali do metody AHP analizę pięciu kryteriów właściwości akustycznych. Czas pogłosu odgrywa dużą rolę w zrozumiałości mowy w pomieszczeniach [20] również w pomieszczeniach dydaktycznych. Wiele opisanych powyżej prac dotyczy pomiarów a niewiele modeli teoretycznych. Warto zauważyć, że modele teoretyczne oparte na teorii statystycznej obarczone są dużymi błędami. Jest wiele prac, które weryfikują modele teoretyczne z pomiarem bądź symulacjami komputerowymi, np. [12]. Na błąd szacowania czasu pogłosu metodami analitycznymi duży wpływ ma określenie współczynników pochłaniania dźwięku przegród ograniczających pomieszczenie. Na problem ten zwrócił uwagę Beranek [2]. Po przeanalizowaniu przykładów stwierdził, że wzór Sabine'a może być wykorzystany do wyznaczania czasu pogłosu w pomieszczeniu, dla którego współczynnik α został wcześniej wyznaczony w podobnym miejscu. Przegląd wszystkich modeli teoretycznych oraz badań, które te modele sprawdzają bądź weryfikują można znaleźć w artykule Nowoświata i Olechowskiej [21]. Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe aspekty, a w szczególność błąd wynikający z doboru parametrów materiałowych czy braku dyfuzyjności pola akustycznego. Autorzy niniejszego artykułu podjęli się opracowania metody pozwalającej doszacować model Sabin'a. Takim doszacowaniem może

*Autor korespondencyjny, e-mail: artur.nowoswiat@polsl.pl

być metoda minimalizacji reszt [22]. W tym celu wykonano szereg pomiarów czasu pogłosu w wybranych pomieszczeniach dydaktycznych oraz obliczono dla nich czasy pogłosu różnymi formułami.

2. METODA

2.1. Formuły teoretyczne

Czas pogłosu obliczany jest za pomocą formuły:

$$T = 0,161 \frac{V}{S\alpha + 4mV} \quad (1)$$

gdzie: V – kubatura pomieszczenia
 $4m$ – pochłanianie dźwięku przez powietrze
 S – powierzchnia przegród ograniczających pomieszczenie
 α – średni współczynnik pochłaniania dźwięku przegród ograniczających pomieszczenie

Formuły teoretyczne różnią się sposobem przyjmowania współczynnika pochłaniania dźwięku. Różnice te wynikają najczęściej z różnego sposobu uśredniania tego współczynnika. Sabine [25] przyjął ten współczynnik, jako średnią arytmetyczną:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i \alpha_i S_i \quad (2)$$

gdzie: $S = \sum_i S_i$. Współczynnik pochłaniania dźwięku

Sabine'a przyjmujemy:

$$\alpha_{Sab.} = \bar{\alpha} \quad (3)$$

Równanie (1), w którym $\alpha = \alpha_{Sab.}$ nazywamy formułą Sabine'a. Eyring [8] zauważył, że gdy w formule Sabine'a $\alpha_{Sab.} = 1$, to czas pogłosu nie wynosi 0 i zaproponował współczynnik pochłaniania dźwięku, jako:

$$\alpha_{Eyr.} = -\ln(1 - \bar{\alpha}) \quad (4)$$

Korygując formułę Sabine'a współczynnikiem pochłaniania dźwięku Eyringa, otrzymujemy dla $\bar{\alpha} \rightarrow 1$ czas pogłosu $T \rightarrow 0$. Ponadto dla $\bar{\alpha} \ll 1$ formuła Eyringa redukuje się do formuły Sabine'a.

Millington [18] z kolei zmodyfikował formułę Eyringa:

$$\alpha_{Mil.} = -\frac{1}{S} \sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i) \quad (5)$$

gdzie: S_i – powierzchnia i -tej przegrody, α_i – współczynnik pochłaniania dźwięku i -tej przegrody.

Dość ciekawe podejście zaproponowali Cremer i Müller [7], którzy zmodyfikowali formułę Millingtona w ten sposób, że najpierw uśredniali główne części przegród według wzoru (2) a następnie zastosowali je we wzorze (5), otrzymując:

$$\alpha_{Cre.} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{S_i} \sum_j \alpha_{ij} S_{ij} \right) \right] \quad (6)$$

gdzie: S_{ij} – jest j -tą powierzchnią podziału i -tej przegrody, α_{ij} jest jej współczynnikiem pochłaniania dźwięku.

Można zauważyć, że dla $\alpha_{ij} = \alpha_i$ współczynnik Cramera i Millingtona są równe.

Z kolei Kuttruff [13, 14] w swoich pracach zaproponował statystyczną dystrybucję dźwięku, biorąc pod uwagę zmienną losową Gaussa oraz prawdopodobieństwo Rayleigha. Na tej podstawie stworzył definicję funkcji średniej drogi swobodnej $\gamma^2 = (\bar{l}^2 - \bar{l}^2) / \bar{l}^2$ jako wariację prawdopodobieństwa. Do obliczenia γ^2 zastosował metodę symulacyjną Monte Carlo.:

$$\alpha_{Kut.} = \alpha_{Eyr.} \left(1 - \frac{\gamma^2}{2} \alpha_{Eyr.} \right) + \frac{\sum_i (1 - \alpha_i) (\bar{\alpha} - \alpha_i) S_i^2}{S^2 (1 - \bar{\alpha})^2} \quad (7)$$

Dla przypadków pomieszczeń prostopadłościennych możemy przyjąć $\gamma^2 = 0,4$.

Kolejne podejście do modyfikacji formuł Sabine'a i Eyringa było dziełem Fitzroya [9], który współczynnik pochłaniania dźwięku przedstawił dla pomieszczeń o zróżnicowanym pochłanianiu dźwięku:

$$\alpha_{Fit.} = -S \left[\frac{S_x}{\ln(1 - \bar{\alpha}_x)} + \frac{S_y}{\ln(1 - \bar{\alpha}_y)} + \frac{S_z}{\ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right]^{-1} \quad (8)$$

S_x – jest powierzchnią sufitu i podłogi, S_y – powierzchnia przeciwległych ścian bocznych S_z – powierzchnia kolejnej pary przeciwległych ścian bocznych.

Na podstawie formuły Fitzroya powstała formuła opracowana przez Arau Puchades [1]:

$$\alpha_{AraP.} = \left[-\ln(1 - \bar{\alpha}_x) \right]^{S_x/S} \cdot \left[-\ln(1 - \bar{\alpha}_y) \right]^{S_y/S} \cdot \left[-\ln(1 - \bar{\alpha}_z) \right]^{S_z/S} \quad (9)$$

Neubauer i Kostek [19] przedstawili modyfikację równania Fitzroy'a, dzieląc odpowiednio człon korekcyjny Kuttruffa na dwie części. Jedną część odzwierciedlającą powierzchnie podłogi i sufitu, natomiast drugą część uwzględniającą wpływ pozostałych ścian.

$$\alpha_{Neu.} = 0,503S \left(\frac{lw}{\alpha_{CF}} + \frac{h(l+w)}{\alpha_{WW}} \right)^{-1} \quad (10)$$

gdzie: l, w, h wymiary pomieszczenia,

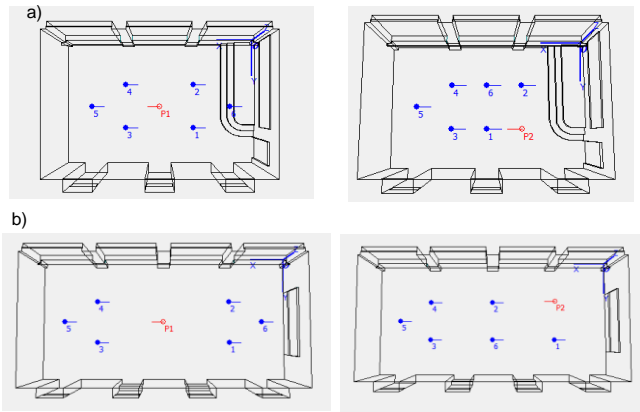
$$\bar{\alpha}_{CF} = -\ln(1 - \bar{\alpha}_{Sab}) + \frac{\rho_{CF} (\rho_{CF} - \bar{\rho}) S_{CF}^2}{(\bar{\rho} S)^2},$$

$$\bar{\alpha}_{WW} = -\ln(1 - \bar{\alpha}_{Sab}) + \frac{\rho_{WW} (\rho_{WW} - \bar{\rho}) S_{WW}^2}{(\bar{\rho} S)^2}$$

przy czym C – oznacza sufit, F – podłogę, S – powierzchnię, ρ – współczynnik odbicia.

2.2. Pomiar

Pomiary czasu pogłosu przeprowadzono w ośmiu salach dydaktycznych. Cztery sale miały kubaturę $198,8 \text{ m}^3$ a cztery kolejne $258,5 \text{ m}^3$. Pomiary wykonano w pustym pomieszczeniu, tzn. bez mebli. 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 $50 - 5000 \text{ Hz}$. Źródło dźwięku wytwarzało poziom ciśnienia akustycznego wystarczający do tego, aby krzywa zaniku rozpoczynała się przynajmniej 35 dB powyżej tła akustycznego w odpowiednim zakresie częstotliwości. W każdym badanym pomieszczeniu, rys.1 zlokalizowano 6 punktów pomiarowych.



Rys. 1. Dwa rodzaje classroom, a) mniejsze, b) większe. Na rysunkach pokazano dwa ustawienia źródła dźwięku $P1$ i $P2$ i lokalizację punktów pomiarowych

Fig. 1. Two types of classroom, a) smaller, b) larger. The illustrations show two locations of the sound source $P1$ and $P2$ and the arrangement of measurement points.

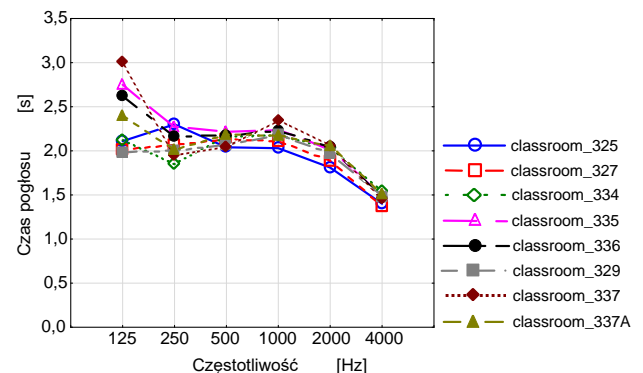
Pomiary wykonywano przy dwóch różnych ustawieniach kolumny głośnikowej. Celem uzyskania wysokiej dokładności wyników i zminimalizowania wpływu losowości sygnału pobudzającego pomiar powtórzono 6 razy w każdym punkcie. Łącznie w każdym pomieszczeniu przeanalizowano 72 pomiary. Wartości uzyskanych czasów pogłosu uśredniono stosując statystyczną regułę trzech sigm. Punkty pomiarowe umieszczono na wysokości $1,2 \text{ m}$ od podłogi pomieszczenia i co najmniej 1 m od powierzchni ściany, natomiast wszechkierunkowe źródło dźwięku na wysokości $1,5 \text{ m}$. Przyjęto dwie pozycje źródła dźwięku $P1$ i $P2$. Pomiar czasu pogłosu we wszystkich badanych pomieszczeniach był wykonany zgodnie z metodą precyzyjną opisaną w standardzie [23]. Na rysunku 2 przedstawiono widok pomieszczenia w trakcie pomiaru.



Rys. 2. Widok pomieszczenia podczas pomiaru z przykładowym ustawieniem kuli głośnikowej i dwóch punktów pomiarowych
Fig. 2. View of the classroom during the measurement with an exemplary location of a bullet loudspeaker and two measurement points

3. WYNIKI

Badano 8 pomieszczeń, w tym 4 pomieszczeń o kubaturze $258,5 \pm 0,11 \text{ m}^3$ i 4 pomieszczenia o kubaturze $190,8 \pm 0,11 \text{ m}^3$. Wyniki czasu pogłosu dla poszczególnych sal dydaktycznych przedstawiono na rysunku 3. Oznaczenie na rysunku 3 postaci classroom_325 oznacza salę dydaktyczną o numerze 325, itd.



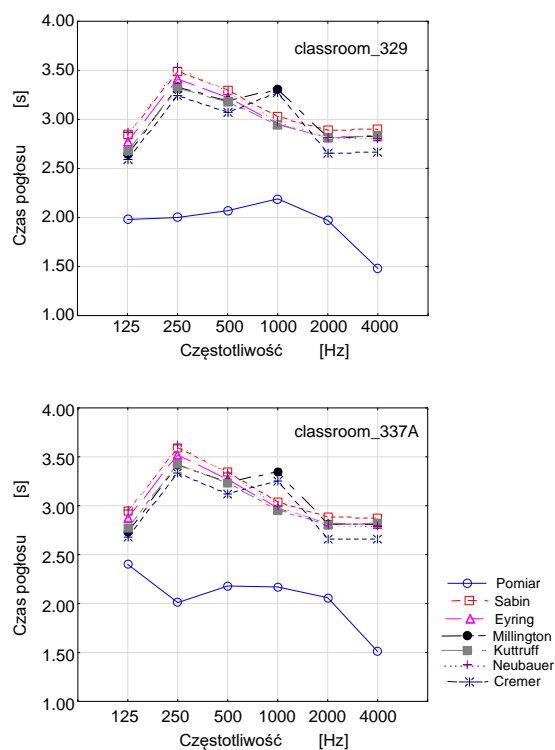
Rys. 3. Zmierzone czasy pogłosu
Fig. 3. Measured reverberation time

Na rysunku 3 można zauważyć dość duże różnice pomiędzy zmierzonymi czasami pogłosu. Szczególnie różnice te uwidaczniają się dla niskich częstotliwości. Taki stan rzeczy potwierdza prosta statystyka. Dla częstotliwości 125 Hz odchylenie standardowe wynosi średnio $0,77 \text{ s}$ a dla częstotliwości 4000 Hz średnia ta wynosi $0,12 \text{ s}$. Do obliczeń za pomocą formuł teoretycznych przyjęto ściany i sufit tynkowane, na podłodze betonowej położono PCV oraz okna o współczynnikach pochłaniania dźwięku jak w tabeli 1.

Tabela 1. Współczynniki pochłaniania dźwięku przyjętych materiałów w pomieszczeniu
 Table 1. Sound absorption coefficients of the materials present in the investigated school classrooms

| Material | Współczynnik pochłaniania dźwięku | | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|
| | Pasma częstotliwości | | | | | |
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Tynk na betonie | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| PCV na betonie | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 |
| Okna | 0,35 | 0,25 | 0,18 | 0,12 | 0,07 | 0,04 |

Wyniki formuł teoretycznych dla przykładowego pomieszczenia z grupy pomieszczeń o kubaturze 190,8m³ oraz z grupy o kubaturze 258,5 m³ przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zmierzone i obliczone czasy pogłosu
 Fig. 4. Measured and calculated reverberation time

Na wykresach przedstawionych na rysunku 3 zrezygnowano z pokazania wyników metodą Fritzoja i jego modyfikacją Arau-Puchades. Czasy pogłosu osiągnane za pomocą tych dwóch formuł bardzo mocno odbiegały od pozostałych formuł i od pomiaru. Taki stan rzeczy nie jest czymś odosobnionym. Już Bistafa i Bradley [3] w swojej pracy przedstawili ten efekt. Różnice pomiędzy wynikami obliczeń za pomocą różnych formuł pokazał również

Neubauer [19]. Wyniki przedstawione w tym artykule potwierdzają wiele innych prac mówiących o różnicach między formułami teoretycznymi.

Rozbieżności otrzymanych wyników są efektem wielu niepewności związanych zarówno ze stosowaniem formuł przeznaczonych do pomieszczeń o dyfuzyjnym polu akustycznym jak i z niepewności pomiarowych. Jednym ze źródeł niepewności przybliżenia modelami teoretycznymi jest wspomniane już założenie, że mamy do czynienia z rozproszonym polem akustycznym, co oznacza, że wszystkie kierunki propagacji są jednakowo prawdopodobne, a poziom ciśnienia akustycznego w każdym punkcie pomieszczenia jest jednakowe.

W Polskiej Normie [24] określono dopuszczalne wartości czasu pogłosu dla sal i pracowni szkolnych.

Sal i pracownie szkolne, sale audytorijne, wykładowe i inne pomieszczenia o zbliżonej funkcji w szkołach podstawowych, średnich i wyższych powinny mieć czas pogłosu nie dłuższy niż 0,6 s dla pomieszczeń o kubaturze 190,8m³ oraz nie dłuższy niż 0,8 s dla pomieszczeń o kubaturze 258,5 m³. Jak widać z wykresów przedstawionych na rysunku 4 dopuszczalne wartości czasu pogłosu są znacząco przekroczone. Należy zwrócić uwagę na to, że w Normie [24] podane dopuszczalne czasy pogłosu są dla sal w pełni umeblowanych, natomiast przedstawione pomiary wykonywane były w salach pustych.

Czas pogłosu nie jest jedynym czynnikiem wpływającym na zapewnienie odpowiednich warunków akustycznych w pomieszczeniach [24]. Innym bardzo ważnym parametrem służącym do oceny odbioru dźwięku słownego jest wskaźnik transmisji mowy STI. W Polskiej Normie [24] zdefiniowany wskaźnik STI, jako miarę przyjmującą wartości w zakresie pomiędzy 0 i 1, reprezentująca, jakość transmisji mowy pod względem zrozumiałości, przez kanał transmisji mowy.

Polska Norma [24] podaje również dla pomieszczeń przeznaczonych do odbioru dźwięku słownego dopuszczalne wartości wskaźnika transmisji mowy STI.

Dla sal i pracowni szkolnych, sal audytorijnych, wykładowych i innych pomieszczeń o zbliżonej funkcji w szkołach podstawowych, średnich i wyższych o kubaturze nieprzekraczającej 2000 m³ wskaźnik STI powinien przekroczyć wartość 0,60. Oznacza to, że zrozumiałość mowy w tych pomieszczeniach nie powinna być mniejsza niż 60%.

W celu określenia wskaźnika STI posłużymy się formułą [20]:

$$STI = -0,2078 \ln T + 0,6488 \quad (11)$$

Formuła ta dla pomieszczeń o nieskomplikowanym kształcie, np. prostopadłościennym i dyfuzyjnym polu akustycznym dość dobrze przybliża wartość STI. W tabeli 2 przedstawiono wyniki STI obliczone za pomocą formuły (11).

Tabela 2. Wskaźnik transmisji mowy STI
Table 2. Speech Transmission Index STI

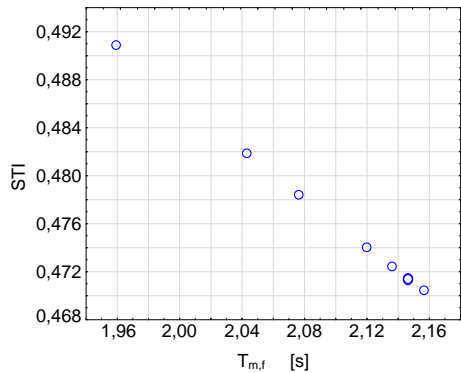
| Sala | Wskaźnik transmisji mowy STI | | | | | |
|------|------------------------------|------|------|------|------|------|
| | Pasma częstotliwości | | | | | |
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 325 | 0,48 | 0,46 | 0,48 | 0,48 | 0,51 | 0,56 |
| 327 | 0,49 | 0,48 | 0,47 | 0,48 | 0,50 | 0,57 |
| 329 | 0,49 | 0,49 | 0,48 | 0,47 | 0,49 | 0,55 |
| 337A | 0,45 | 0,49 | 0,47 | 0,47 | 0,48 | 0,55 |
| 334 | 0,47 | 0,50 | 0,47 | 0,47 | 0,48 | 0,54 |
| 335 | 0,42 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,49 | 0,55 |
| 336 | 0,43 | 0,47 | 0,47 | 0,46 | 0,48 | 0,55 |
| 337 | 0,40 | 0,49 | 0,48 | 0,45 | 0,48 | 0,56 |

Obliczone wskaźniki STI dla pustych pomieszczeń (zalecenie normowe – pomieszczenie umeblowane) pokazują bardzo słabą zrozumiałość mowy nie osiągając zalecanej wartości 0,6.

Innym parametrem do oceny klas szkolnych jest średnia arytmetyczna czasów pogłosu dla 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz, która opisana jest wzorem [17]:

$$T_{m,f} = \frac{1}{3} \sum_{f=500 \text{ Hz}}^{2000 \text{ Hz}} T_f \quad (11)$$

gdzie: T_f jest zmierzonym czasem pogłosu w paśmie częstotliwości f_i . Można pokazać wysoką korelację z STI.



Rys. 5. Wykres rozrzutu STI i $T_{m,f}$

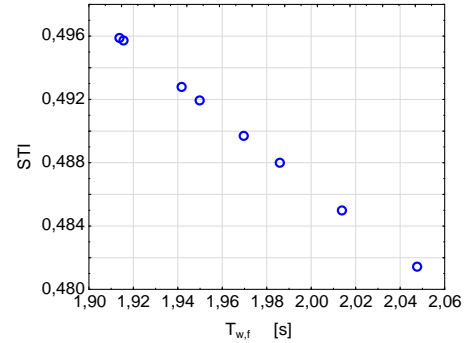
Fig. 5. Scatterplot STI i $T_{m,f}$

Współczynnik korelacji wynosi $r = -0,9999$ przy prawdopodobieństwie testowym $p \ll 0,05$.

$T_{m,f}$ nie zawsze odzwierciedla odczucia subiektywne uczniów, więc często wprowadza się inną średnią [17]:

$$T_{w,f} = \frac{1}{5} \sum_{f=250 \text{ Hz}}^{4000 \text{ Hz}} T_f \quad (12)$$

gdzie: T_f jest zmierzonym czasem pogłosu w paśmie częstotliwości f_i . W tym przypadku również można pokazać wysoką korelację z STI.



Rys. 6. Wykres rozrzutu STI i $T_{w,f}$

Fig. 6. Scatterplot STI i $T_{w,f}$

W tym przypadku również współczynnik korelacji wynosi $r = -0,9999$ przy prawdopodobieństwie testowym $p \ll 0,05$.

4. WNIOSKI

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pomiarów czasu pogłosu i obliczeń za pomocą formuł teoretycznych dla ośmiu sal szkolnych.

- Wyniki pomiarów pomimo podobnych warunków podczas badań wykazują się szczególnie dla niskich częstotliwości zróżnicowaniem wyników podobnych sal. Wydawać się może, że głównie spowodowane to jest niepewnością pomiarową, na którą wpływało zróżnicowanie tła akustyczne.
- Czasy pogłosu obliczone za pomocą różnych formuł teoretycznych znacząco się różnią. Spowodowane to jest tym, że każda z formuł opiera się na statystycznej metodzie Sabine'a.
- Formuła Cremera najlepiej przybliży czas pogłosu w przedstawionych pomieszczeniach dydaktycznych
- Obliczone dla ośmiu pomieszczeń wskaźniki transmisji mowy STI wskazują na bardzo słabe warunki do odbioru dźwięku słownego. Wyniki te osiągnięto dla pustych pomieszczeń. Można przypuszczać, że dla pomieszczeń z ławkami i krzesłami warunki te zdecydowanie się poprawią.
- Wskaźnik transmisji mowy jest mocno skorelowany z $T_{m,f}$ oraz $T_{w,f}$. Uzyskano zdecydowanie wyższą korelację niż Mikulski i Radosz [17]. Można to tłumaczyć tym, że w pracy [17] STI wyznaczono pomiarowo a w niniejszej pracy za pomocą wzoru (11). A to z kolei potwierdza bardzo wysoką korelację STI ze wzoru (11) z czasem pogłosu, co wykazano w pracy [20].

Niniejszy artykuł jest przyczynkiem do większej pracy (wysłanej do publikacji), w której na podstawie przedstawionych tutaj wyników wyznaczono metodą minimalizacji reszt MMR [22] współczynniki korygujące

wzór Sabine'a. Wyniki te wskazały, że korekcja wzoru Sabine'a metodą MMR zdecydowanie przybliży wyniki teoretyczne do rzeczywistego pomiaru.

EXPECTED REVERBERATION TIME IN CLASSROOMS

Summary: This article deals with the expected reverberation time using the known theoretical models. The measurements of the reverberation time were performed in eight teaching rooms at the Civil Engineering Faculty, the Silesian University of Technology. The reverberation time was then calculated using the known theoretical formulas. The results of the theoretical calculations were compared with the measurement results and the best model estimating the reverberation time for the presented rooms was determined. In addition, the tested rooms were evaluated considering the verbal comprehension. The analyzed rooms were divided in terms of cubic capacity into two groups. In the first group there were four rooms with an average cubic capacity of 190.8 m³, while in the other there were also four rooms, but with the cubic capacity of 258.5 m³. Measurements were performed in an empty room using the intermittent noise method. The presented results will be used for multi-criteria assessment of school premises and to determine the correction coefficient of the Sabine model for this type of rooms.

Literatura

- [1] Arau-Puchades. H. *An Improved Reverberation Formula*. *Acustica* 65 (1988) 163 – 180.
- [2] Beranek L.L. *Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption*. *J. Acous. Soc. Am.* 120(3) (2006) 1399 – 1410.
- [3] Bistafa S.R., Bradley J.S. *Predicting reverberation Times in a simulated classroom*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 108(4), (2000), 1721-1731
- [4] Bradley J.S., Sato H. *The intelligibility of speech in elementary school classrooms*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(4), (2008), 2078-2086
- [5] Campbell C., Svensson C., Nilsson E. *The same reverberation time in two identical rooms does not necessarily mean the same levels of speech clarity and sound levels when we look at impact of different ceiling and wall absorbers*. *Inter. Noise*. Melbourne Australia, (November 2014) 16-19
- [6] Choi Y. *Effect of occupancy on acoustical conditions in University classrooms*. *Appl. Acoust.* 114, (2016) 36-43
- [7] Cremer L., Müller H.A. *Principles and Applications of Room Acoustics* (Applied Science, London, 1982), Vol. 1. P.235
- [8] Eyring C.F. *Methods of calculating the average coefficient of sound absorption*. *J. Acoust. Soc. Am* 4, (1933) 178-192
- [9] Fitzroy D. *Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption*. *J. Acoust. Soc. Am.* 31, (1959) 893-897
- [10] Hodgson M. *Experimental investigation of the acoustical characteristics of University classrooms*. *J. Acoust. Soc. Am.* 106(4) (1999) 1259
- [11] John J., Thampuran A.L., Premlet B. *Objective and subjective evaluation of acoustic comfort in classrooms: A comparative investigation of vernacular and modern school classroom in Kerala*. *Appl. Acoust.* 104 (2016) 33-41
- [12] 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)
- [13] Kuttruff H. *Sound decay in enclosures with non-difuse sound field*. *Proceedings of the Wallace Clement Sabine Centennial Symposium, Cambridge MA 5-7 June 1994*
- [14] Kuttruff H. *Room Acoustics* (Elsevier Applied Science, London, 1991) pp. 204-207, 123-128, 118-120, 255
- [15] Madbouly A.I., Noaman A.Y., Ragab A.H.M., Khedra A.M., Fayoumi A.G. *Assessment model of classroom acoustics criteria for enhancing speech intelligibility and learning quality*. *Appl. Acoust.* 114, (2016) 147-158
- [16] Mealings K.T., Buchholz J.M., Demuth K., Dillon H. *Investigating the acoustics of a sample of open plan and enclosed Kindergarten classrooms in Australia*. *Appl. Acoust.* 100 (2015) 95-105
- [17] Mikulski W., Radosz J. *Acoustics of Classrooms in Primary Schools- Results of the Reverberation Time and the Speech Transmission Index Assessments in Selected Buildings*. *Archives of Acoustics* (2011) 36(4), s. 777-793
- [18] Millington G. *A modified formula for reverberation*. *J. Acoust. Soc. Am.* 4 (1932) 69 – 82
- [19] Neubauer R.O., Kostek B. *Prediction of the Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non-Uniformly Distributed Sound Absorption*, *Archives of Acoustics* 26(3), (2000) 183 – 201.
- [20] Nowoświat A., Olechowska M. *Fast estimation of speech transmission index using the reverberation time*. *Appl. Acoust.* 102 (2016) 55-61
- [21] Nowoświat A., Olechowska M. *Investigation Studies on the Application of Reverberation Time*, *Arch. Acoust.* 41(1) (2016) 15-26
- [22] Nowoświat A., Olechowska M., Ślusarek J. *Prediction of reverberation time using the residual minimization method*, *Appl. Acoust.* 106 (2016) 42-50
- [23] PN-EN ISO 3382-2:2010 Akustyka-Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń-Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach
- [24] PN-B-02151-4:2015. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Część 4. Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach
- [25] Sabine W.C. *Collected Papers on Acoustics* (Peninsula, Los Altos, CA, 1992), pp. 43–52.