

Parametry opisujące jakość akustyczną sal lekcyjnych

Parameters describing the acoustic quality of classrooms

dr hab. inż. Artur Nowoświat (ORCID: 0000-0002-0277-7388), dr inż. Rafał Żuchowski (ORCID: 0000-0002-0110-0500), dr inż. Marcelina Olechowska (ORCID: 0000-0001-6112-8460), Wydział Budownictwa, Katedra Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli, Politechnika Śląska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.3605

Streszczenie: Jakość akustyczna sal lekcyjnych jest terminem zaproponowanym do opisanie w sposób obiektywny właściwości akustycznych pomieszczeń do prowadzenia lekcji odpowiadającym subiektywnym wrażeniom odbioru dźwięku. Szczegółowe wymagania dotyczące warunków pogłosowych w pomieszczeniu zawarte są w normie PN-B-02151-4:2015-06, w której określono wymagania odnośnie czasu pogłosu w pomieszczeniach z uwagi na potrzebę ograniczenia hałasu pogłosowego oraz ze względu na zapewnienie odpowiedniej słyszalności i zrozumiałości mowy, zapewniających możliwość właściwego użytkowania pomieszczenia zgodnie z ich przeznaczeniem. Warto też zwrócić uwagę na fakt, że opisane w normie wymagania nie odzwierciedlają w całości subiektywnego odczucia związanego z odbiorem dźwięku czy też odbiorem hałasu pochodzącego od wyposażenia budynku. Zatem potrzeba opisu akustyki spowodowała prace nad metodami uwzględniającymi szereg innych istotnych czynników wpływających na tę akustykę. Do tego celu w literaturze zaproponowano metodę wskaźnikową, która polega na wyznaczeniu pojedynczego globalnego indeksu liczbowego na podstawie indeksów cząstkowych.

Słowa kluczowe: czas pogłosu, krzywa zaniku dźwięku, akustyka klas szkolnych, wskaźnik oceny akustycznej.

Abstract: The acoustic quality of classrooms is a term proposed to objectively describe the acoustic properties of classrooms that correspond to subjective perception of sound. Detailed requirements for reverberation conditions in the room are included in the PN-B-02151-4: 2015-06 standard, which specifies the requirements for reverberation time in rooms due to the need to reduce reverberation noise and to ensure adequate audibility and speech intelligibility, ensuring the possibility of proper use of the room according to their intended purpose. It is also worth noting that the requirements described in the standard do not fully reflect the subjective feeling related to the reception of sound or the reception of noise from building equipment. Therefore, the need to describe the acoustics resulted in the work on methods that take into account a number of other important factors that influence this acoustics. For this purpose, an indicator method has been proposed in the literature which consists of determining a single global numerical index on the basis of partial indices.

Keywords: reverberation time, sound decay curve, classroom acoustics, acoustic rating index.

1. Wprowadzenie

Sala lekcyjna jest miejscem, w którym odbywa się proces poznawczy i przyswajanie wiedzy. Na ten proces i na percepcję mowy uczniów w klasie często szkodliwy wpływ mają właściwości akustyczne tego pomieszczenia. Zła akustyka w klasie często sprawia, że słuchanie nauczyciela jest żmudnym procesem [1]. Kluczowym pytaniem jest: jak uczeń ma przyswajać wiedzę, gdy ma trudności ze słuchaniem i zrozumieniem nauczyciela? Akustyka w klasie jest niezbędna do stworzenia środowiska sprzyjającego nauce. Wysoki poziom hałasu tła akustycznego i długi czas pogłosu utrudniają komunikację między uczniami i nauczycielem. Kolejną miarą opisującą akustykę klas szkolnych jest wskaźnik transmisji mowy *STI*, który opisuje zrozumiałość mowy. Wiele badań dotyczyło środowiska akustycznego klas [2, 3], a niektóre kraje opracowały normy i przepisy dotyczące środowiska akustycznego klas [4]. Wyniki tych badań i przepisów sugerują, że czas pogłosu dla klas

szkolnych powinien mieścić się w zakresie od 0,3 do 0,9 s. Również w Polsce powstała norma PN-B-02151-4:2015-06 [5] określająca między innymi wymagania akustyczne dla klas szkolnych.

2. Podstawowe definicje

Jednym z najważniejszych parametrów opisujących akustykę wewnątrz jest czas pogłosu.

Definicja 1: Pogłosem nazywamy zjawisko stopniowego zanikania energii dźwięku po wyłączeniu źródła.

Definicja 2: Czasem pogłosu nazywamy czas mierzony od momentu wyłączenia źródła, po którym poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu zmniejszy się o 60 dB.

Bardzo często podczas projektowania pomieszczeń używa się wzoru analitycznego Sabine'a opisanego np. w pracy [6]:

$$T_{Sab} = \frac{0,161V}{S\bar{\alpha}_{Sab}} [s], \bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (1)$$

gdzie:

V – kubatura pomieszczenia,

S – pole powierzchni ograniczających pomieszczenie.

Iloczyn $S\alpha$ określa chłonność akustyczną, która również zdefiniowana jest w przedmiotowej normie.

Definicja 3: Chłonność akustyczna A (równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej pomieszczenia) jest to hipotetyczne pole powierzchni, w m^2 całkowicie pochłaniającej dźwięk, bez efektów dyfrakcyjnych, przy którym czas pogłosu byłby taki sam jak w rozważanym pomieszczeniu, jeżeli powierzchnia ta byłaby jedynym elementem pochłaniającym w tym pomieszczeniu.

Kolejnym ważnym parametrem opisującym akustykę wewnątrz jest zdefiniowany w normie PN-B-02151-4:2015-06 [5] wskaźnik transmisji mowy.

Definicja 4: Wskaźnik transmisji mowy STI jest to miara przyjmująca wartości w zakresie pomiędzy 0 i 1, reprezentująca jakość transmisji mowy pod względem zrozumiałości, przez kanał transmisji mowy.

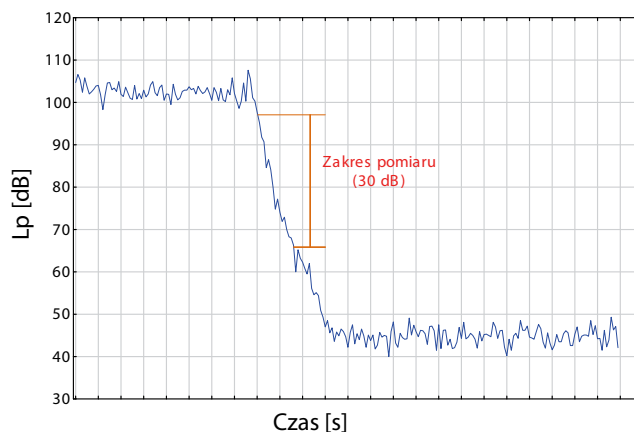
3. Metody pomiaru i szacowania parametrów akustycznych wewnątrz

3.1. Pomiar czasu pogłosu

Pomiary przeprowadza się w oparciu o wytyczne zawarte w PN-EN ISO 3382-1:2009 [7] oraz PN-EN ISO 3382-2:2010 [8]. Pomiary wykonuje się przy użyciu metody szumu przerywanego. Stosuje się pobudzenie pomieszczenia za pomocą szerokopasmowego szumu ukształtowanego tak aby uzyskać w przybliżeniu różowe widmo dźwięku pogłosowego w stanie ustalonym w zakresie obejmującym pasma 1/3 oktawowo o częstotliwościach środkowych 50–5000 Hz. Źródło wytwarza poziom ciśnienia akustycznego wystarczający do tego, aby krzywa zaniku rozpoczynała się przynajmniej 35 dB powyżej tła akustycznego w odpowiednim zakresie częstotliwości. Źródło dźwięku umiejscawia się w dwóch punktach. Punkty pomiarowe umieszcza się na wysokości 1,2 m od poziomu podłogi pomieszczenia, natomiast wszechkierunkowe źródło dźwięku na wysokości 1,5 m. Najczęściej pomiar wykonuje się w sześciu punktach pomiarowych i powtarza się go w każdym punkcie co najmniej trzy razy. Mierzoną wielkością jest poziom ciśnienia akustycznego, a podczas pomiarów rejestruje się krzywe zaniku dźwięku. Przykładową krzywą przedstawiono na rysunku 1.

Czas pogłosu wyznacza się według poniższego algorytmu:

- Wyszukuje się wartości poziomu ciśnienia akustycznego zmniejszonego o 5 dB od wartości początkowej będącej poziomem ciśnienia akustycznego w momencie wyłączenia źródła dźwięku. Wartość tę nazywamy L_p i odczytujemy dla niej czas t_p (oś pozioma).
- Wyszukuje się wartości poziomu ciśnienia akustycznego zmniejszonego o 25 dB od wartości L_p i nazywa się ją L_k oraz odczytuje się dla niej czas t_k (oś pozioma).



Rys. 1. Krzywa zaniku dźwięku z zaznaczoną dynamiką 30 dB

- Wyznacza się czas pogłosu na podstawie zależności:

$$T = \frac{60}{d} \quad (2)$$

gdzie:

d – szybkość zaniku dźwięku w dB/s, $d = \frac{\Delta L}{\Delta \tau}$,

ΔL – różnica poziomów dźwięku,

$\Delta \tau$ – przyrost czasu zaniku dźwięku.

- Uśrednia się arytmetycznie czasy pogłosu dla wszystkich pomiarów i wyznacza się uśrednioną wartość czasu pogłosu i niepewność standardową.

3.2. Pomiar wskaźnika transmisji mowy

Wskaźnik transmisji mowy STI (*Speech Transmission Index*) jest to parametr określający w sposób obiektywny zrozumiałość mowy. Technicznie pomiar polega na emisji w pomieszczeniu szumu o paśmie zbliżonym do pasma mowy ludzkiej modulowanego częstotliwościami zbliżonymi do tych, które występują w naturalnej mowie. Poziom natężenia dźwięku sygnału powinien odpowiadać poziomowi natężenia normalnego głosu. Następnie bada się zmiany głębokości modulacji (zniekształcenia) sygnału w różnych miejscach pomieszczenia. Sposób wykonania pomiarów przedstawiono w normie PN-EN IEC 60268-16:2021-6 [9]. Jak już wspomniano, w metodzie pomiaru STI wykorzystuje się specjalny sygnał testowy (symulacja mowy), który tak jak mowa obejmuje dwa widma, tj. widmo słyszalne i modulacyjne. Widmo słyszalne imitowane jest przy użyciu sygnału szumu, które składa się z 7 pasm oktawowych o częstotliwościach środkowych w zakresie od 125 do 8000 Hz. Następnie pojedyncze zakresy oktawowo moduluje się 14 częstotliwościami w odstępach tercjowych w zakresie od 0,63 do 12,5 Hz [10]. Niestety taka procedura wymusza wykonanie 98 pomiarów, które stanowią kombinację widma słyszalnego i modulacyjnego. Wskaźnik transmisji mowy STI jest obliczany z wyników pomiarów funkcji przenoszenia modulacji (*Modulation Transfer Function*).

Przedstawiona metoda pomiarowa jest bardzo czasochłonna i kosztowna, dlatego też opracowano kilka pochodnych tej metody bazujące na metodzie STI . Powstały również

modele statystyczne szacujące wskaźnik STI w zależności od zmierzonego czasu pogłosu. Kilka takich modeli przedstawiono poniżej:

- model opracowany przez Tang i Yeung [11]:

$$STI = 0,5895 - 0,4422 \log(T_{500}) \quad (3)$$

- modele opracowane przez Escobar i Morillas [12]:

$$STI = 0,778 - 0,143 T_{500} \quad (4)$$

$$STI = 0,634 - 0,192 \ln(T_{500}) \quad (5)$$

- model opracowany przez Nowoświata [15, 16]:

$$STI = -0,2078 \ln T + 0,6488 \quad (6)$$

4. Wymagania i projektowanie akustyki klas szkolnych

Wymagania i wytyczne podzielimy na trzy części: wymagania normy [5], czas optymalny [14] i metoda wskaźnikowa [2].

4.1. Wymagania normowe

Norma PN-B-02151-4:2015-06 [5] odnosi się do wartości dopuszczalnych czasu pogłosu, minimalnych chłonności akustycznej i minimalnych wskaźnika transmisji mowy danego pomieszczenia. Wyniki czasu pogłosu przedstawione w tabeli 1 odnoszą się do każdego pasma oktawowego o częstotliwości środkowej 125–8000 Hz, przy czym dla pasma 125 Hz zwiększony jest zakres tolerancji o 30%. Natomiast analizę chłonności akustycznej przeprowadza się dla trzech pasm oktaowych o częstotliwościach środkowych 500, 1000, 2000 Hz.

Tabela 1. Zestawienie wymagań normowych określonych w PN-B-02151-4-2015-06 w zakresie obiektów szkolnych [15]

Lp.	Funkcja pomieszczenia	Wymagania		
		Czas pogłosu T [s]	Wskaźnik transmisji mowy STI	Chłonność akustyczna, A , pomieszczenia [m^2]
1	Klasa szkolna	$\leq 0,6-1,0^1$	$\geq 0,60$	–
2	Sala gimnastyczna	$\leq 1,5-1,8^1$	–	–
3	Świetlice szkolne	$\leq 0,6$	–	–
4	Stołówki szkolne	$\leq 0,6$	–	–
5	Czytelnie, biblioteki	$\leq 0,6-0,8^1$	–	–
6	Pokój nauczycielski	$\leq 0,6$	–	–
7	Szatnie, w których ubrania zamknięte są w szafkach z pełnymi drzwiami	–	–	$\geq 0,6 \times S$
8	Korytarze	–	–	$\geq 1,0 \times S$
9	Klatki schodowe	–	–	$\geq 0,4 \times S^2$

¹ Wartość zależna od kubatury analizowanego pomieszczenia.

² Krotność powierzchni, S , rzutu pomieszczenia.

³ Jako powierzchnię, S , należy przyjąć iloczyn rzutu powierzchni klatki schodowej i liczby kondygnacji.

4.2. Czas optymalny

Jedną z propozycji oceny akustyki klas szkolnych opisanych w literaturze jest optymalny czas pogłosu T_{opt} , który oblicza się za pomocą wzoru (5):

$$T_{opt} = 0,32 \log V - 0,17 \quad (7)$$

gdzie: V jest objętością pomieszczenia w zakresie od 30 do 1000 m^3 .

Wartość T_{opt} zgodnie z opisem przedstawionym w pracy [16] powinien spełniać warunki:

$$0,65 \cdot T_{opt} < T < 1,2 \cdot T_{opt} \text{ dla } 125 \text{ i } 4000 \text{ Hz}$$

$$0,8 \cdot T_{opt} < T < 1,2 \cdot T_{opt} \text{ dla } 250, 500, 1000 \text{ i } 2000 \text{ Hz}$$

4.3. Metoda wskaźnikowa

Globalny wskaźnik oceny akustyki klas szkolnej proponuje się za pomocą formuły [2]:

$$QI_G = \frac{\sum_{i=1}^n QI_i \eta_i}{\sum_{i=1}^n \eta_i} = \frac{QI_{RT} \eta_{RT} + QI_{SI} \eta_{SI} + QI_{SE} \eta_{SE} + QI_{SD} \eta_{SD} + QI_{BN} \eta_{BN} + QI_{SNR} \eta_{SNR}}{\eta_{RT} + \eta_{SI} + \eta_{SE} + \eta_{SD} + \eta_{BN} + \eta_{SNR}} \quad (8)$$

przy czym odpowiednie wagi przyjmuje się jak w tabeli 2.

Tabela 2. Wagi poszczególnych wskaźników

Wskaźnik parametru QI_i	Wagi η_i
QI_{RT} – wskaźnik pogłosowy	$\eta_{RT} = 0,8$
QI_{SI} – wskaźnik zrozumiałości mowy	$\eta_{SI} = 1,0$
QI_{SE} – wskaźnik głośności mowy	$\eta_{SE} = 0,3$
QI_{SD} – wskaźnik rozkładu natężenia dźwięku	$\eta_{SD} = 0,5$
QI_{BN} – wskaźnik tła akustycznego	$\eta_{BN} = 1,0$
QI_{SNR} – wskaźnik stosunku sygnału do szumu	$\eta_{SNR} = 0,4$

Odpowiednie wskaźniki szacuje się na podstawie odpowiednich wzorów, wykorzystując przy tym wyniki pomiarów lub szacowania odpowiednich parametrów. Poniżej przedstawiono sposoby szacowania odpowiednich wskaźników przedstawionych w tabeli 2.

- Wskaźnik pogłosowy – Radosz [2]:

$$QI_{RT} = -0,48(T_{2kHz})^4 + 2,55(T_{2kHz})^3 - 4,77(T_{2kHz})^2 + 3,13(T_{2kHz}) + 0,34 \quad (9)$$

- Wskaźnik zrozumiałości mowy – Radosz [2]:

$$QI_{SI} = -0,55 \cdot STI + 0,44 \cdot CI \quad (10)$$

gdzie:

$$CI = 0,00616 \cdot (D_{50(1kHz)})^2 + 0,0615 \cdot (D_{50(1kHz)}) + 085 \quad (11)$$

- Wyrazistość – Lam [17] – Nowoświat [13]:

$$D_{50} = 1 - e^{-\frac{0,69}{T}} \quad (12)$$

- Wskaźnik transmisji mowy – Nowoświat [13]:

$$STI = -0,2078 \ln T + 0,6488 \quad (13)$$

- Wskaźnik głośności mowy – Radosz [2]:

$$QI_{SE} = -0,041(L_{Aeq,1m}) + 3,46 \quad (14)$$

przy czym $L_{Aeq,1m}$ przyjmuje następujące wartości: 78 dB – bardzo głośna mowa, 72 dB – głośna mowa, 66 dB – podniesiony głos, 60 dB – normalna mowa.

- Wskaźnik rozkładu natężenia dźwięku – Radosz [2]:

$$QI_{SD} = 0,296 \cdot QI_{SD,1kHz} + 0,37 \cdot QI_{SD,2kHz} + 0,333 \cdot QI_{SD,4kHz} \quad (15)$$

gdzie:

$$QI_{SD,f} = -0,08 \cdot (\Delta G_{ref,f}) + 1 \quad (16)$$

Wartość $\Delta G_{ref,f}$ określić można jako głośność dźwięku pogłosowego, który zależy od mocy dźwięku, czasu pogłosu oraz objętości pomieszczenia. Miarą głośności jest stosunek czasu pogłosu w zakresie od 500– 000 Hz do objętości pomieszczenia.

- Wskaźnik stosunku sygnału do szumu – Radosz [2]:

$$QI_{SNR} = 0,058 \cdot e^{0,18(SNR)+0,14} \quad (17)$$

Wartość SNR można przybliżyć jako wartość 0,5 na podstawie histogramu ważonego A poziomu ciśnienia akustycznego w klasie podczas wykładu.

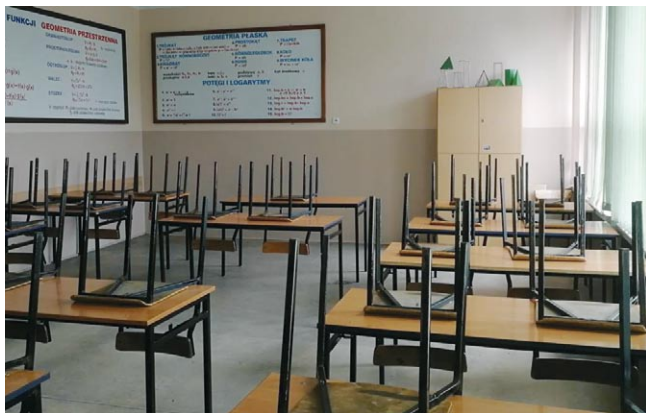
- Wskaźnik tła akustycznego – Radosz [2]:

$$QI_{BN} = 0,002 \cdot (L_{Aeq})^2 - 0,246 \cdot (L_{Aeq}) + 7,64 \quad (18)$$

gdzie: L_{Aeq} jest liczbową wartością poziomu hałasu w tle w pustej klasie. L_{Aeq} nie powinien przekroczyć następujących wartości: 40 dB – całkowity hałas ze wszystkich źródeł, 35 dB – hałas z budynku i innych urządzeń w budynku lub na zewnątrz.

5. Przykład zastosowania analiz

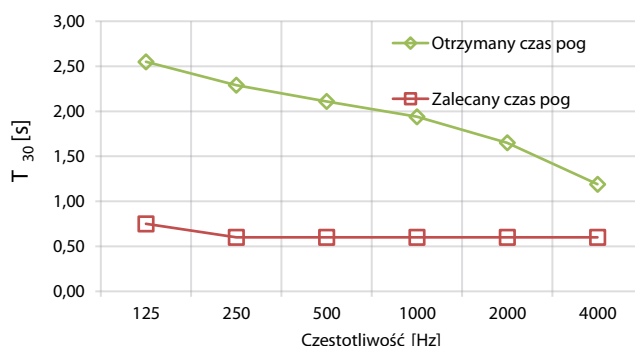
Analizowana klasa szkolna znajduje się w szkole, która powstała jako pomnik z okazji jubileuszu Tysiąclecia Państwa Polskiego. Budynek szkolny składa się z 13 segmentów, ma 28 izb i 46 klas lekcyjnych o łącznej kubaturze 35 287,03 m³. Analizowana sala lekcyjna (rys. 2) ma objętość 154,75 m³ i powierzchnię całkowitą przegród ograniczających 190,86 m².



Rys. 2. Widok analizowanej sali lekcyjnej

5.1. Wymagania normowe

W pierwszej kolejności dokonano pomiaru czasu pogłosu zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 3 niniejszego artykułu (rys. 3).



Rys. 3. Wynik czasu pogłosu na tle zalecanego czasu pogłosu w normie PN-B-02151-4:2015-06 [5]

W kolejnym kroku oszacowano wskaźnik transmisji mowy STI różnymi metodami i uśredniono wynik jako miarodajny do dalszych analiz. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki szacowania wskaźnika STI

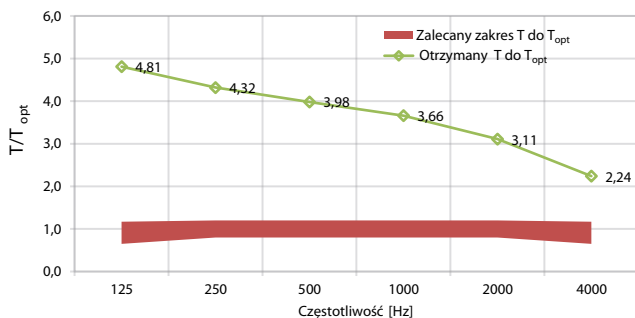
Autor wzoru	Tang i Yeung [13]	Escobar i Morillas [14]		Nowoświat [15], [16]	Wartość średnia
		liniowy	logarytmiczny		
Wartość wskaźnika transmisji mowy (STI)	0,446	0,476	0,491	0,515	0,482

Jak widać na podstawie rysunku 3 i tabeli 3 wartości zalecane przez normę PN-B-02151-4:2015-06 [5] są niespełnione. Czas pogłosu jest zdecydowanie za wysoki, a wskaźnik transmisji mowy jest za niski.

5.2. Optymalny czas pogłosu

Na podstawie formuły (7) obliczono optymalny czas pogłosu, który wynosi $T_{opt} = 0,531$ s.

Otrzymane wyniki z wartościami zalecanymi przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wyniki czasu optymalnego w funkcji częstotliwości

Jak można zauważyć na rysunku 4, również weryfikacja metodą czasu optymalnego wskazuje na bardzo słabe właściwości akustyczne przedstawionej klasy lekcyjnej.

5.3. Metoda wskaźnikowa

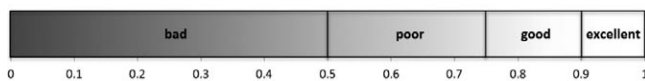
Jako ostatnią do oceny badanego pomieszczenia zastosowano metodę wskaźnikową. Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wynik analiz metody wskaźnikowej

Nazwa wskaźnika	Wartość dla sali z wyposażeniem	Waga wskaźnika
Wskaźnik pogłosu	0,415	0,8
Wskaźnik zrozumiałości mowy	0,577	1,0
Wskaźnik wysiłku mowy*	0,270	0,3
Wskaźnik dystrybucji siły dźwięku	0,576	0,5
Wskaźnik szumu tła	1,0	1,0
Wskaźnik stosunku sygnału do szumu	-0,080	0,5
Globalny indeks jakości akustycznej pomieszczeń	0,55	-

*Czas pogłosu został przekroczony o wartość większą niż 65%, dlatego przyjmujemy mowę bardzo głośną (78 dB), dla której wskaźnik wysiłku mowy jest ustalony jako wartość 0,270 w obu poniższych przypadkach

Radosz w swojej pracy [2] przedstawił również ocenę klasy szkolnej w zależności od otrzymanej wartości globalnego indeksu.



Można zauważyć, że otrzymany wynik dla analizowanego przykładu jest na granicy złej i średniej jakości akustycznej. Wyniki to ze stosunkowo niskiej wartości wskaźnika tła akustycznego, który ma istotną wagę w analizach co znacząco zawiąza otrzymany wynik.

6. Podsumowanie

Do najważniejszych parametrów akustycznych opisujących akustykę pomieszczeń dydaktycznych należy zaliczyć czas pogłosu i wskaźnik transmisji mowy.

Do oceny akustycznej klas szkolnych z powodzeniem można stosować trzy najważniejsze metody:

- metoda normowa,
- metoda optymalnego czasu pogłosu,
- metoda wskaźnika globalnego oceny.

Każda z tych metod uwypukla inne właściwości podlegające ocenie. Metoda normowa wprost bierze pod uwagę pomiar czasu pogłosu i wskaźnika transmisji mowy (czasami chłonność akustyczną) do oceny akustycznej pomieszczenia. Norma podaje wartości graniczne, a obiektywny pomiar wskazuje wartości rzeczywiste, które porównywane

są z wartościami granicznymi. Metoda czasu optymalnego również oparta jest na pomiarze czasu pogłosu, jednak tylko stosunek optymalnego czasu pogłosu i rzeczywiste jest miarą oceny akustycznej pomieszczenia. Ostatnia z metod, czyli metoda wskaźnikowa wydaje się, że pozwala ocenić pomieszczenie kompleksowo. Jednak metoda ta zawiąza wskaźnik globalny w przypadku niskiego tła akustycznego pustej sali. Dlatego też można sugerować stosowanie tej metody wraz z metodą normową. Takie podejście pozwala na kompleksową i miarodajną ocenę badanego pomieszczenia.

Na zakończenie należy zwrócić uwagę na analizowany przykład. Wykazano na bazie pomiarów i odpowiedniego szacowania, że klasy szkolne w szkołach, tzw. tysiąclatkach mają złe warunki do odbioru dźwięku słownego, co może przyczynić się do słabej komunikacji uczniów i nauczyciela, a w efekcie końcowym do słabszego przyswajania wiedzy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Peng J., Lau S., Zhao Y., Comparative study of acoustical indices and speech perception of students in two primary school classrooms with an acoustical treatment, *Applied Acoustics*, 164, 2020, str. 107297
- [2] Radosz J., Global Index of the Acoustic Quality of Classrooms, *Archives of Acoustics*, 38(2)2013, str. 159–168
- [3] Nowoświat A., Olechowska M., Estimation of reverberation time in classrooms using the Residual Minimization Method, *Archives of Acoustics*, 42(4)2017, str. 609–617
- [4] Picard M., Bradley J. S., Revisiting speech interference and remedial solutions in classrooms, *Audiology*, 40, 2001, str. 221–244
- [5] PN-B-02151-4:2015-06: Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań
- [6] Nowoświat A., Zastosowanie Metod Perturbacyjnych w ocenie akustycznej wnętrz do odbioru dźwięku słownego, *Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice*, 2019
- [7] PN-EN ISO 3382-1:2009: Akustyka – pomiar parametrów akustycznych – Część 1: Pomieszczenia specjalne
- [8] PN-EN ISO 3382-2:2010: Akustyka – pomiar parametrów akustycznych – Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach
- [9] PN-EN IEC 60268-16:2021-6: Urządzenia systemów elektroakustycznych – Część 16: Obiektywna ocena zrozumiałości mowy za pomocą wskaźnika transmisji mowy
- [10] Garlińska U., Michalak P., Pawłowski S., Popielarczyk T., Pomiary zrozumiałości mowy dźwiękowych systemów ostrzegawczych, *BiTP*, 39(3)2015, str. 161–171
- [11] Tang S. K., Yeung M. H., Speech transmission index or rapid speech transmission index for classrooms? A designer's point of view, *Journal of Sound and Vibration*, 276, 2004, str. 431–439
- [12] Escobar V. G., Morillas J. M., Analysis of intelligibility and reverberation time recommendations in educational rooms, *Applied Acoustics*, 96, 2015, str. 1–10
- [13] Nowoświat A., Zastosowanie analizy statystyczno-korelacyjnej w badaniach akustyki wnętrz. Rozprawa doktorska, Gliwice, 2005
- [14] Soczyński Riberio R. et al, Acoustical treatment characterization of a classroom with wood-based composites, *Applied Acoustics* 178, 2021, str. 107967
- [15] Zaremba R., Akustyka pomieszczeń szkolnych – problemy i wymagania, *Inżynier budownictwa – e-wydanie*, 14.01.2020
- [16] Mikulski W., Wyniki badań wpływu adaptacji akustycznych sal lekcyjnych na jakość komunikacji werbalnej, *Medycyna Pracy*, 64(2)2013, str. 207–215
- [17] Lam Y. W., Importance of early energy in Room Acoustics, *AE0F3/AE0F4, Acoustics of Enclosed Spaces*, University of Salford, 1999, str. 10–28