

Witold Mikulski

WARUNKI AKUSTYCZNE W POMIESZCZENIACH BIUROWYCH OPEN SPACE – ZASTOSOWANIE ŚRODKÓW TECHNICZNYCH W TYPOWYM POMIESZCZENIU

ACOUSTIC CONDITIONS IN OPEN PLAN OFFICE – APPLICATION OF TECHNICAL MEASURES IN A TYPICAL ROOM

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy / Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, Warszawa, Poland

Zakład Zagrożeń Wibroakustycznych / Department of Vibroacoustic Hazards

STRESZCZENIE

Wstęp: Hałas w pomieszczeniach biurowych open space nie przekracza poziomów dopuszczalnych ze względu na ochronę słuchu. Podstawowy jego negatywny wpływ na pracowników to utrudnienie w wykonywaniu pracy i uciążliwość. Aby zapewnić odpowiednie akustyczne warunki pracy w takich pomieszczeniach, należy stosować specjalne rozwiązania techniczne. **Materiał i metody:** W artykule opublikowanym w numerze 5. „Medycyny Pracy” 2016 oceniono pod względem warunków akustycznych typowe pomieszczenia biurowe open space. Żadne z tam rozpatrywanych pomieszczeń nie spełniało wszystkich kryteriów, dlatego w niniejszym artykule wybrano jedno pomieszczenie, a następnie zaproponowano różne rodzaje rozwiązań technicznych, których celem było sprawdzenie, czy uzyskanie odpowiednich akustycznych warunków pracy w pomieszczeniach open space jest możliwe. Akustyczną efektywność tych rozwiązań weryfikowano za pomocą symulacji cyfrowej programem ODEON. Przed zastosowaniem symulacji model sprawdzono metodą porównania wyników pomiarów i obliczeń. **Wyniki:** Uzyskanie odpowiednich wartości wszystkich ocenianych parametrów, przy wprowadzeniu sygnałów maskujących sygnał mowy, pozwala spełnić wszystkie przyjęte kryteria. Stosunkowo najłatwiej uzyskać odpowiedni czas pogłosu, tj. chłonność akustyczną. Dużo trudniejsze jest uzyskanie odpowiednich wartości parametrów oceny wyznaczanych z poziomu dźwięku A mowy. Największą trudnością jest zapewnienie odpowiednich wartości parametrów oceny wyznaczanych ze wskaźnika transmisji mowy (speech transmission index – STI). W ostatnim przypadku jest konieczne (poza adaptacją akustyczną) zastosowanie urządzeń maskujących sygnał mowy. Przeprowadzone badania wykazały techniczną możliwość uzyskania odpowiednich warunków akustycznych w pomieszczeniach open space. **Wnioski:** Jedną z głównych przyczyn skarg pracowników biurowych w pomieszczeniach open space są nieodpowiednie akustyczne warunki pracy. Dlatego należy stosować w tych pomieszczeniach specjalne rozwiązania techniczne – nie tylko dźwiękochłonne sufity podwieszane i wysokie ekrany akustyczne, ale również urządzenia maskujące mowę. Med. Pr. 2018;69(2):153–165

Słowa kluczowe: akustyka pomieszczeń biurowych open space, dźwiękochłonne sufity podwieszane, chłonność akustyczna pomieszczenia, adaptacja akustyczna, czas pogłosu, maskowanie sygnału mowy

ABSTRACT

Background: Noise in open plan offices should not exceed acceptable levels for the hearing protection. Its major negative effects on employees are nuisance and impediment in execution of work. Specific technical solutions should be introduced to provide proper acoustic conditions for work performance. **Material and Methods:** Acoustic evaluation of a typical open plan office was presented in the article published in “Medycyna Pracy” 5/2016. None of the rooms meets all the criteria, therefore, in this article one of the rooms was chosen to apply different technical solutions to check the possibility of reaching proper acoustic conditions. Acoustic effectiveness of those solutions was verified by means of digital simulation. The model was checked by comparing the results of measurements and calculations before using simulation. **Results:** The analysis revealed that open plan offices supplemented with signals for masking speech signals can meet all the required criteria. It is relatively easy to reach proper reverberation time (i.e., sound absorption). It is more difficult to reach proper values of evaluation parameters determined from A-weighted sound pressure level (SPLA) of speech. The most difficult is to provide proper values of evaluation parameters determined from speech transmission index (STI). Finally, it is necessary (besides acoustic treatment) to use devices for speech masking. The study proved that it is technically possible to reach proper acoustic condition. **Conclusions:** Main causes of employees complaints in open plan office are inadequate acoustic work conditions. Therefore, it is necessary to apply specific technical solutions – not only sound absorbing suspended ceiling and high acoustic barriers, but also devices for speech masking. Med Pr 2018;69(2):153–165

Key words: acoustic of open plan office, sound absorbing suspended ceiling, sound absorption of room, acoustic treatment, reverberation time, masking the speech signal

Autor do korespondencji / Corresponding author: Witold Mikulski, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Zagrożeń Wibroakustycznych, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, e-mail: wimik@ciop.pl
Nadesłano: 10 listopada 2016, zatwierdzono: 14 września 2017

WSTĘP

W Polsce coraz powszechniejsze są pomieszczenia biurowe open space (nazewnictwo wg PN-EN ISO 3382-3:2012 [1], wg innych norm: otwarte pomieszczenia do prac administracyjnych, np. PN-B-02151-4:2015 [2]). W ostatnim dziesięcioleciu ich liczba zwiększyła się ponad dwukrotnie. Jest to zgodne z tendencjami wykorzystania pomieszczeń biurowych open space w najbardziej rozwiniętych krajach na świecie. Na przykład 70% Amerykanów zatrudnionych w biurach pracuje w pomieszczeniach open space, co wynika z niższych kosztów ich budowy i eksploatacji. W biurach tego typu wskaźnik powierzchni biurowej na pracownika jest najniższy, znacznie mniejszy niż w klasycznych pokojach biurowych. Praca w takich pomieszczeniach wprowadza elementy oddziałujące na pracowników zarówno korzystnie, jak i szkodliwie.

Do zalet można zaliczyć ciekawą architekturę i aranżację wnętrza, jasno oświetlone pomieszczenia i stanowiska pracy, odpowiednią kolorystykę, możliwość częstszej komunikacji oraz nowoczesne rozwiązania infotechnologiczne (IT). Do wad należą: spadek koncentracji uwagi, brak prywatności, zła akustyka (w tym hałas) oraz konieczność unifikacji temperatury i wilgotności. Wśród nich właśnie hałas jest wskazywany przez 49% pracowników jako główny element przeszkadzający w pracy. Poza tym hałas o poziomie 55–65 dB (typowe rozmowy) [3] zmniejsza motywację do podjęcia trudniejszych zadań, zwiększa stężenie adrenalin, sprawia, że pracownicy rzadziej zmieniają pozycję w fotelu, oraz zmniejsza – z powodu braku prywatności – efektywność. Mimo stosowania szczególnie rozbudowanych adaptacji akustycznych w pomieszczeniach tego typu praca w nich jest przez pracowników określana jako wyjątkowo uciążliwa.

W artykule autora niniejszej pracy, zamieszczonym w „Medycynie Pracy” [4], przedstawiono kryteria oceny pomieszczeń biurowych open space (na podstawie PN-EN ISO 3382-3:2012 [1] i PN-B-02151-4:2015 [2]) i wyniki badań 6 wybranych typowych pomieszczeń open space w Warszawie. Nie tylko żadne z nich nie spełniało wszystkich kryteriów opartych na 6 parametrach kryterialnych, ale nawet w pomieszczeniach, w których zastosowano szczególnie dużo materiałów dźwiękochłonnych i ekranów akustycznych, wartości wszystkich parametrów kryterialnych nie osiągnęły zadowalających wartości. Skłania to do znalezienia odpowiedzi, czy możliwe jest osiągnięcie zakładanych przez te kryteria warunków pracy.

Spśród stosowanych kryteriów stosunkowo najłatwiej uzyskać odpowiednio krótki czas pogłosu (tj. odpowiednio dużą chłonność akustyczną). Dużo trudniejsze jest osiągnięcie odpowiednich wartości parametrów oceny wyznaczanych z poziomu dźwięku A mowy. Największą trudnością jest uzyskanie odpowiednich wartości parametrów oceny, wyznaczanych ze wskaźnika transmisji mowy (speech transmission index – STI). Skłania to do wykorzystania od dawna znanego – choć w pomieszczeniach biurowych dotychczas niestosowanego – specjalnego środka technicznego, wpływającego korzystnie na uzyskanie odpowiednio małej zrozumiałości mowy. Jest nim generowanie w pomieszczeniu dodatkowego hałasu maskującego dźwięki mowy. Techniczna realizacja tego rozwiązania na stanowiskach pracy polega na wytworzeniu sygnału maskującego przez specjalne źródło lub źródła maskujące sygnał mowy. Hałas maskujący musi być na tyle głośny, żeby zmniejszył zrozumiałość mowy do wymaganego poziomu, a jednocześnie nie powodował przekroczenia dopuszczalnych poziomów hałasu na stanowiskach pracy. Nie powinien on także zwiększać uciążliwości pracy.

W niniejszej pracy podano kryteria oceny akustycznej pomieszczeń biurowych open space (modyfikując wartość kryterialną jednego z nich), opisano wybrane typowe pomieszczenie biurowe open space (podano za wynikami badań zamieszczonych w „Medycynie Pracy” [4], rezultaty pomiarów i oceny akustycznej pomieszczenia) oraz zaproponowano modyfikację akustyczną tego pomieszczenia i wprowadzenie źródeł maskujących mowę. Dzięki tym rozwiązaniom ocena pomieszczenia pod względem spełnienia wszystkich stosowanych kryteriów okazała się pozytywna. W ten sposób udowodniono możliwość uzyskania odpowiednich akustycznych warunków pracy w pomieszczeniach open space. Weryfikację akustyczną przeprowadzono metodą symulacji cyfrowej programem komputerowym ODEON, przeznaczonym do analizy akustycznej rozpatrywanych pomieszczeń.

MATERIAŁ I METODY

Kryteria oceny i parametry kryterialne pomieszczeń biurowych open space

Ocena akustyczna pomieszczeń open space polega na porównaniu zmierzonych lub obliczonych wartości parametrów kryterialnych z ich wartościami dopuszczalnymi. Ocena jest pozytywna, gdy wszystkie kryteria są spełnione (tab. 1):

Tabela 1. Wartości kryterialne i typowo występujące parametrów oceny warunków akustycznych pomieszczeń biurowych typu open space
Table 1. Criteria and typically occurring values of parameters of acoustic conditions assessment of open plan office

Parametr Parameter	T_{inf} lub T_{inf} T_{inf} or T_{inf}	$T_{125-4000}$ $T_{125-4000}$ Hz	$A_{1/m2}$ [m ²]	r_D [m]	r_p [m]	$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	$D_{2,5}$ [dB]
Wartości kryterialne określone na podstawie / Criteria values according to:							
PN-EN ISO 3382-3:2012 [1], Mikulski [4], Mikulski i Warmiak / Mikulski and Warmiak [8]	-	-	$\leq 5^{**}$	-	-	$\leq 48^{**}$	$\geq 7^{**}$
PN-B-02151-4:2015-06 [2]	-	-	$\geq 1,1^{**}$	-	-	-	-
obliczone przez autora z $A_{1/m2}$ / calculated by the author of $A_{1/m2}$ [2]*	0,42**	-	-	-	-	-	-
PN-B-02151-4:2015-06 [2] dla pokoi biurowych / for office rooms	$\leq 0,6$	-	-	-	-	-	-
Hongisto [9]	0,4	-	-	-	-	-	-
Virjonen i wsp. / Virjonen et al. [10]	-	-	≤ 5 – doskonała / excellent 5–8 – dobra / good 8–11 – dostateczna / fair 11–15 – niska / poor	-	-	-	≥ 11 – doskonała / excellent 8–11 – dobra / good 5–8 – dostateczna / fair 3–5 – niska / poor
Keränen [11]			klasa pomieszczenia / class of room: A – najwyższa / the highest B C D E – najniższa / the lowest				≤ 5 5–8 8–11 11–15 >15
Rindel i Christensen [12] / Rindel and Christensen [13]	-	-	≤ 5 – dobra / good > 10 – niska / poor	-	-	≤ 48 – dobra / good > 50 – niska / poor	≥ 7 – dobra / good < 5 – niska / poor
Wartości typowo występujące określone na podstawie / Typically occurring values according to:							
PN-EN ISO 3382-3:2012 [1], Rindel i Christensen / Rindel and Christensen [13], Keränen [15]	-	-	> 9–10	> 20	> 49–50	< 5–6	
Rindel [14]	-	-	> 9–10	-	-	-	-

T_{inf} – średni czas pogłosu w oktaowych pasmach częstotliwości 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz / mean reverberation time in frequency bands 500 Hz, 1000 Hz, and 2000 Hz, $T_{125-4000}$ – czas pogłosu w pasmach częstotliwości 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz i 8000 Hz / reverberation time in frequency bands 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz and 8000 Hz.

$A_{1/m2}$ – chłonność akustyczna pomieszczenia odniesiona do 1 m² podłogi w pasmach częstotliwości 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz / sound absorption of room with reference to 1 m² of the floor in frequency bands 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz, r_D – odległość rozproszenia / distraction distance, r_p – odległość prywatności / privacy distance, $L_{p,A,S,4m}$ – poziom dźwięku A mowy przy podwojeniu odległości / spatial decay rate of the speech in doubled distance.

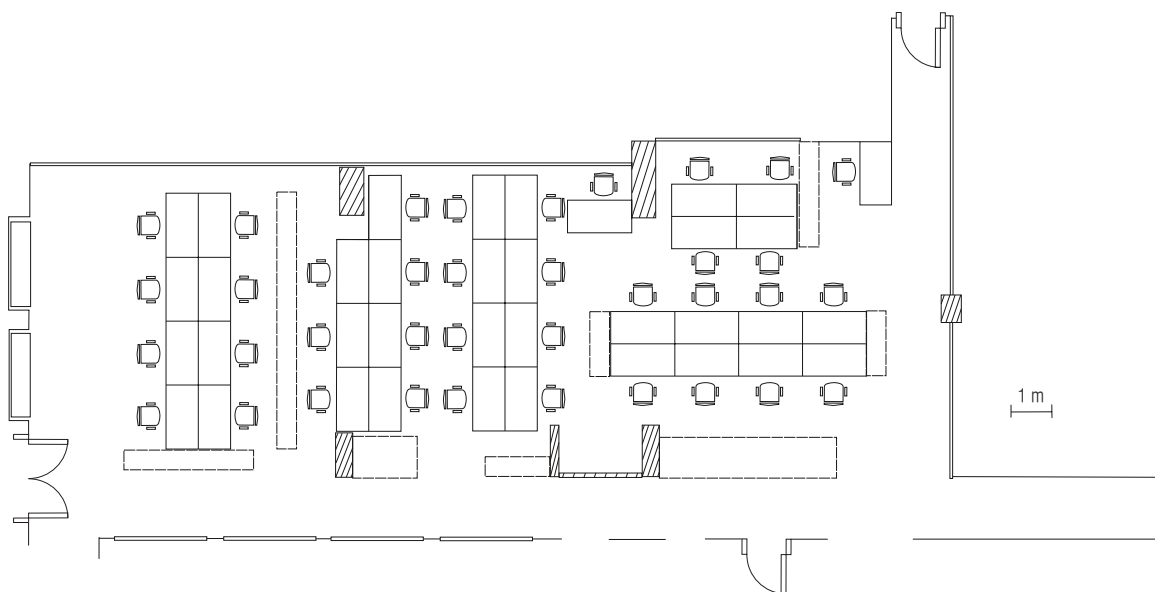
$D_{2,5}$ – spadek poziomu dźwięku A mowy przy podwojeniu odległości / speech level of speech at a distance of 4 m, *Maksymalna wartość czasu pogłosu dla rozpatrywanego pomieszczenia obliczona przez autora niniejszego artykułu (ze wzoru Sabine'a na podstawie PN-B-02151-3:2015 [6]) z minimalnej chłonności akustycznej na podstawie PN-B-02151-4:2015-06 [2] (w pasmach częstotliwości 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz) / Maximal value of reverberation time for examined space calculated by the author (after Sabine's formula, according to PN-B-02151-3:2015 [6]) from minimal sound absorption according to PN-B-02151-4:2015-06 [2] (in frequency bands 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz).

** Wartości przyjęte w niniejszym artykule jako kryterialne zgodnie z normami PN-EN ISO 3382-3:2012 [1] i PN-B-02151-4:2015-06 [2] / Values adapted in this article as criteria in accordance with standards PN-EN ISO 3382-3:2012 [1] and PN-B-02151-4:2015-06 [2].
 n_p – nie określono / not rated.

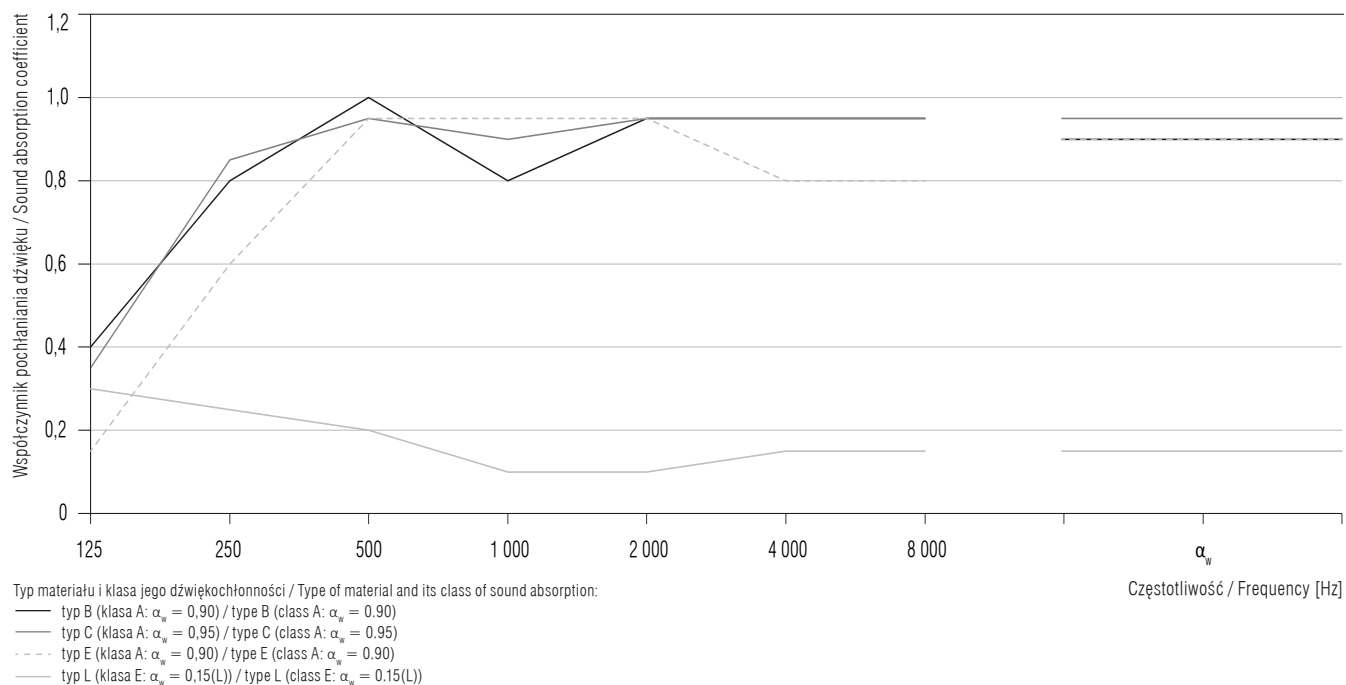
- Czas pogłosu – w badaniach określa się go w pasmach oktawowych z zakresu częstotliwości 125–8000 Hz oraz tzw. T_{mf} (wartość średnia z czasów pogłosu w oktawowych pasmach częstotliwości 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz). Metoda pomiaru tego parametru została podana w normie PN-EN ISO 3382-2:2010 [5]. W niniejszym artykule wykorzystano wyniki pomiarów czasu pogłosu wykonane metodą techniczną [4].
 - Chłonność akustyczna pomieszczenia – odniesiona do 1 m² rzutu pomieszczenia (tj. podłogi dla tego typu pomieszczeń). Czas pogłosu i chłonność akustyczna pomieszczenia są ze sobą silnie związane, dlatego wartość tego parametru można obliczyć z czasu pogłosu metodą uproszczoną ze wzoru Sabine'a, zgodnie z PN-B-02151-3:2015 [6]. W niniejszym artykule ze względów praktycznych zastosowano 1 z tych 2 parametrów, tj. czas pogłosu (głównie w oktawowych pasmach częstotliwości 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz oraz wartości średniej dla tych 3 pasm częstotliwości, czyli czas pogłosu (T_{mf})).
 - Odległość rozproszenia (r_p) – parametr określany w oparciu o wartości wskaźnika transmisji mowy STI (metoda pomiaru została podana w normach PN-EN ISO 3382-3 [1], PN-EN 60268-16:2011 [7] lub piśmiennictwie [4,8]).
 - Odległość prywatności (r_p) – parametr określany w oparciu o wartości wskaźnika transmisji mowy STI (metodę pomiaru podano w normach PN-EN ISO 3382-3 [1], PN-EN 60268-16:2011 [7] lub piśmiennictwie [4,8]).
 - Poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m od mówiącego ($L_{p,A,S,4m}$) – parametr ten określa się w pomieszczeniu przy włączonym źródle mowy (metoda pomiaru została podana w normie PN-EN ISO 3382-3 [1] lub piśmiennictwie [4,8]).
 - Spadek poziomu dźwięku mowy na podwojenie odległości ($D_{2,S}$) – parametr ten określa się w pomieszczeniu przy włączonym źródle mowy (metodę pomiaru podano w normie PN-EN ISO 3382-3 [1] lub piśmiennictwie [4,8]).
- Wartości kryterialne i typowo występujące w pomieszczeniach open space według różnych źródeł przedstawiono w tabeli 1. W niniejszej pracy przyjęto wartości kryterialne wg PN-EN ISO 3382-3 [1] i PN-B-02151-4:2015 [2]. Jak podano wyżej, w niniejszej pracy podjęto próbę udowodnienia, że możliwa jest taka adaptacja akustyczna typowego pomieszczenia, żeby spełniała ono ww. kryteria. Potwierdzenie tego – nawet na 1 typowym przypadku (case study) – jest wskazaniem, że można tak zmodyfikować pomieszczenia open space, żeby spełniały kryteria, a w konsekwencji zapewniały odpowiednie warunki pracy.

Charakterystyka obiektu

Badania przeprowadzono metodą symulacji cyfrowej obiektu rzeczywistego. Obiektem było pomieszczenie open space o kubaturze 664 m³, polu powierzchni całkowitej 634 m², polu powierzchni podłogi 218 m² i wysokości 3,05 m (ryc. 1).

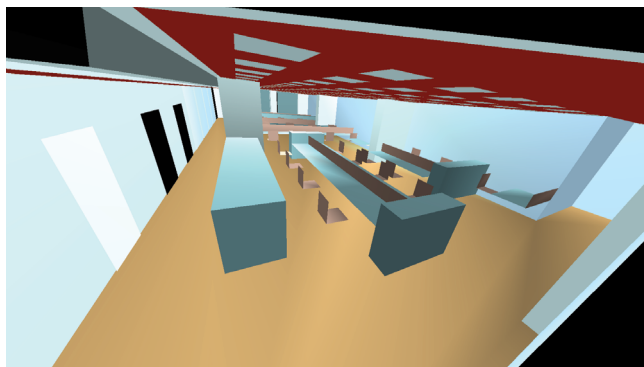
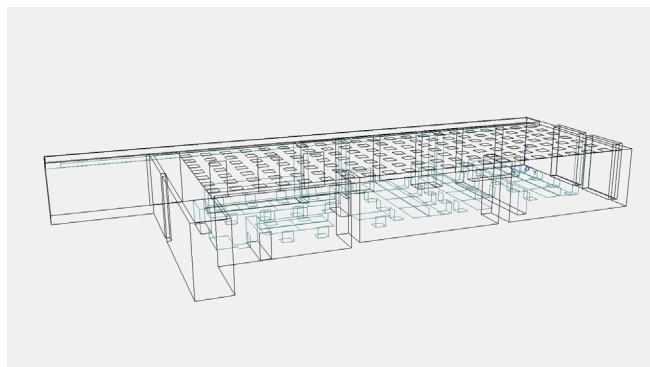


Ryc. 1. Poziomy rzut badanego pomieszczenia biurowego typu open space
Fig. 1. Horizontal projection of the examined open plan office



α_w – współczynnik pochłaniania dźwięku / sound absorption coefficient.

Ryc. 2. Współczynniki pochłaniania dźwięku badanych materiałów dźwiękochłonnych
Fig. 2. Sound absorption coefficients of sound absorbing materials taken into consideration



Ryc. 3. Widok badanego pomieszczenia biurowego typu open space przed adaptacją akustyczną wygenerowany w programie ODEON
Fig. 3. View of the examined open plan office before acoustic treatment generated in the ODEON program

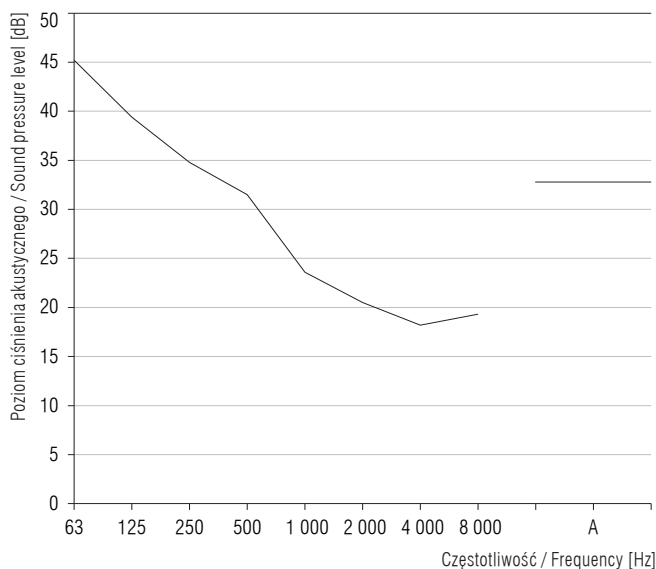
Materiały dźwiękochłonne nazwano typami: B, C, E i L (nazwy nie mają związku z klasą tłumienia dźwięku materiału). Poza materiałem L pozostałe materiały należą do klasy tłumienia dźwięku A.

W pomieszczeniu znajdował się dźwiękochłonny sufit podwieszany z materiałem dźwiękochłonnym typu C (o współczynniku pochłaniania dźwięku wskazanym na rycinie 2.).

W suficie było zainstalowanych 147 paneli oświetleniowych i wentylacyjnych typu L (zmniejszających

skuteczność akustyczną zastosowanego sufitu (ryc. 2)). W pomieszczeniu znajdowało się 37 stanowisk pracy. Widok pomieszczenia przedstawiono na rycinie 3.

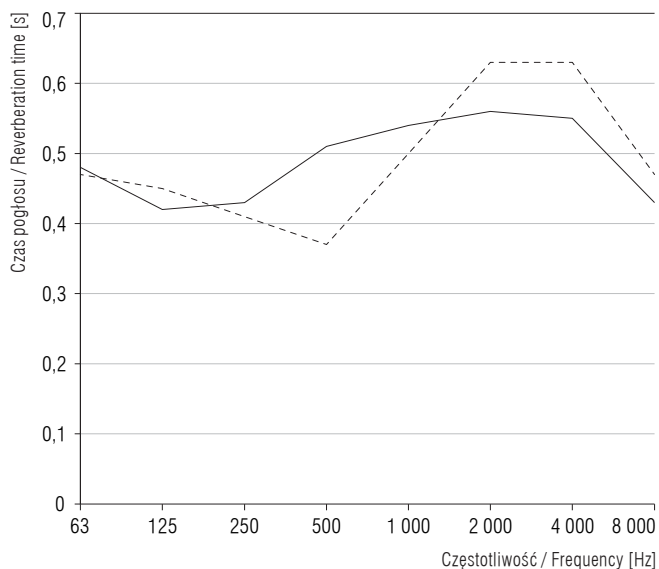
Do obliczeń przyjęto tło akustyczne z pomiarów (ryc. 4). Wysokość ekranów akustycznych wynosiła 0,4 m powyżej krawędzi stołów (tj. 1,1 m od podłogi). Wyniki symulacji cyfrowej warunków akustycznych w rozpatrywanym pomieszczeniu, dalej w artykule nazwane „przed adaptacją”, podano na rycinach 5–7.



A – poziom ciśnienia akustycznego korygowany charakterystyką częstotliwościową / A-weighted sound pressure level.

Ryc. 4. Widmo tła akustycznego badanego pomieszczenia biurowego typu open space przed adaptacją akustyczną (dane do symulacji cyfrowej w programie ODEON)

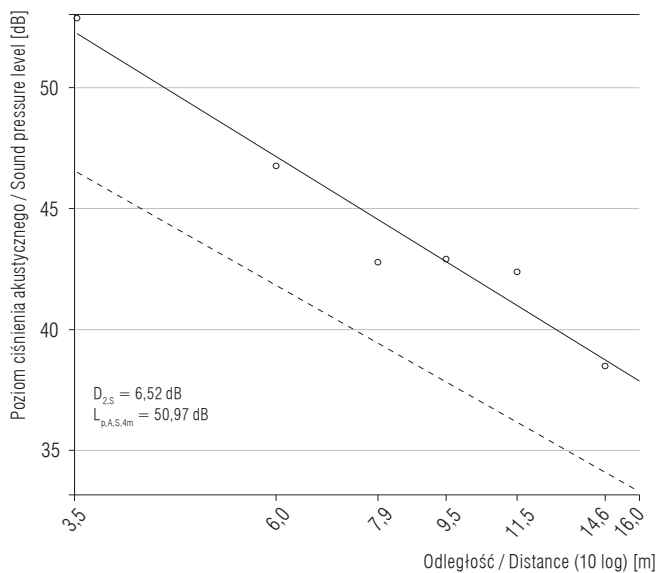
Fig. 4. Spectrum of background noise of the examined open plan office before acoustic treatment (data for digital simulation in the ODEON program)



— obliczony / calculated
- - - zmierzony / measured

Ryc. 6. Pomiar i symulacja cyfrowa czasu pogłosu w punktach w badanym pomieszczeniu biurowego typu open space przed adaptacją akustyczną

Fig. 6. Measurement and digital simulation of reverberation time in the examined open plan office before acoustic treatment

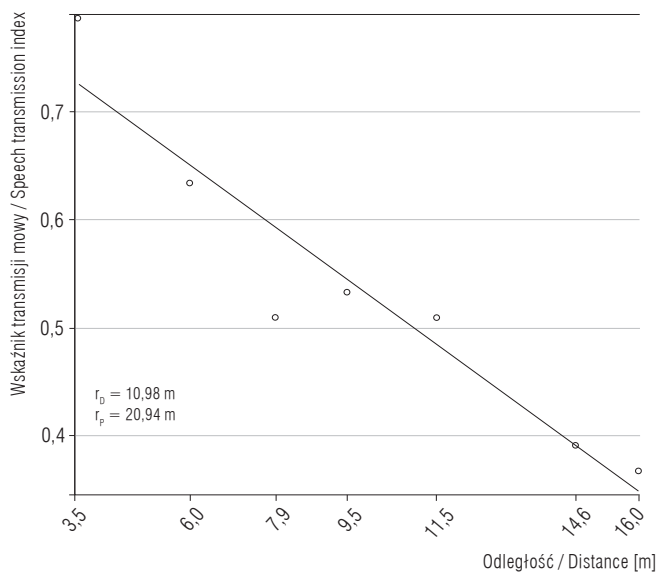


○ obliczony SPLA / calculated SPLA
— regresja logarytmiczna SPLA / logarithmic regression line of SPLA
- - - SPLA w funkcji odległości od źródła w przestrzeni otwartej / SPLA in free field

Skróty jak w tabeli 1 / Abbreviations as in Table 1.

Ryc. 5. Poziom dźwięku A (SPLA) w funkcji odległości od źródła mowy w badanym pomieszczeniu biurowego typu open space przed adaptacją akustyczną (wyniki symulacji cyfrowej w programie ODEON)

Fig. 5. A-weighted sound pressure level (SPLA) in function of the distance from speech source in the examined open plan office before acoustic treatment (results of digital simulation in the ODEON program)



○ obliczony STI / simulated STI
— regresja liniowa obliczonego STI / regression line of calculated STI

Skróty jak w tabeli 1 / Abbreviations as in Table 1.

Ryc. 7. Wskaźnik transmisji mowy (STI) w funkcji odległości od źródła mowy w badanym pomieszczeniu biurowego typu open space przed adaptacją akustyczną (wyniki symulacji cyfrowej w programie ODEON)

Fig. 7. Speech transmission index (STI) in function of the distance from speech source in the examined open plan office before acoustic treatment (results of digital simulation in the ODEON program)

Tabela 2. Symulacja cyfrowa i pomiar parametrów kryterialnych oceny warunków akustycznych pomieszczenia biurowego typu open space**Table 2.** Digital simulation and measurement of criteria parameters of acoustic conditions assessment of open plan office

Parametr kryterialny Parameter criteria	Pomiary* Measurements*	Obliczenia Calculations	Różnica między wartościami obliczonymi a zmierzonymi Difference between the measured values and calculation
Czas pogłosu w pasmach częstotliwości / Reverberation time in frequency bands [s]:			
63 Hz	0,47	0,48	0,01
125 Hz	0,45	0,42	-0,03
250 Hz	0,41	0,43	0,02
500 Hz	0,37	0,51	0,14
1 000 Hz	0,50	0,54	0,04
2 000 Hz	0,63	0,56	-0,07
4 000 Hz	0,63	0,55	-0,08
8 000 Hz	0,47	0,43	-0,04
500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz (M) (T_{mf})	0,50	0,54	0,04
Odległość rozproszenia / Distraction distance (r_D) [m]	10,40	10,98	0,58
Odległość prywatności / Privacy distance (r_P) [m]	21,50	20,94	-0,56
Spadek poziomu dźwięku mowy na podwojenie odległości / Spatial decay rate of the speech in doubled distance ($D_{2,S}$) [dB]	5,70	6,52	0,82
Poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m od źródła / A-weighted sound pressure level of speech at a distance of 4 m ($L_{p,A,S,4m}$) [dB]	50,30	50,97	0,67

M – średnia / mean.

* Na podstawie: Mikulski W.: Warunki akustyczne w pomieszczeniach biurowych open space – wyniki badań pilotażowych [4] / Based on: Mikulski W.: Acoustic conditions in open plan offices – Pilot test results [4].

Pozostałe skróty jak w tabeli 1 / Other abbreviations as in Table 1.

Porównanie wyników obliczeń symulacji cyfrowej i wyników pomiarów (przed adaptacją) – weryfikacja możliwości przeprowadzenia dalszej analizy metodą symulacji cyfrowej

Zbiorcze wyniki symulacji cyfrowej i pomiarów (te ostatnie z danych autora [4]) parametrów kryterialnych przedstawiono w tabeli 2. (czas pogłosu dodatkowo podano na rycinie 7.). Wyniki pomiarów i symulacji cyfrowej są na tyle zbieżne, że pozwalają zastosować do dalszej analizy metodę symulacji cyfrowej.

Metoda badań wpływu adaptacji akustycznej pomieszczenia i maskowania sygnałów mowy na warunki akustyczne

Celem badań było poszukiwanie takich rozwiązań adaptacji akustycznej rozpatrywanego pomieszczenia i maskowania sygnałów mowy, żeby w efekcie ich zastosowania uzyskać zadane warunki akustyczne (tj. spełnić podane wcześniej kryteria akustyczne dla pomieszczeń biurowych open space).

Metoda polega na określaniu parametrów akustycznych rozpatrywanych pomieszczeń metodą symulacji

cyfrowej programem ODEON. Służy on do obliczania parametrów charakteryzujących pole akustyczne w pomieszczeniach. Model matematyczny tego programu jest oparty na geometrycznych metodach predykcji akustycznej. Wykorzystuje 2 metody: źródeł pozornych i promieniową. Do obliczeń szacunkowych wykorzystywane są także metody statystyczne. Jedną z głównych zalet programu jest dość obszerna baza danych niezbędnych do obliczeń (zawierająca m.in. współczynniki pochłaniania dźwięku materiałów dźwiękochłonnych). Kolejną zaletą są stosunkowo częste aktualizacje, w tym dodające nowe moduły obliczeniowe do określania nowo wprowadzonych parametrów charakteryzujących wnętrza (np. biurowe open space wg PN-EN ISO 3382-3:2012 [1]).

Uwzględniane zmiany w stosunku do stanu istniejącego (przed adaptacją pomieszczenia) polegały na:

- wymianie w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym materiału dźwiękochłonnego typu C na typ B (ryc. 2),
- dodaniu w pomieszczeniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego typu B w części, gdzie go nie było,
- zmniejszeniu liczby kasetonów oświetleniowych i wentylacyjnych ze 147 do 30 (w powstałych otwo-

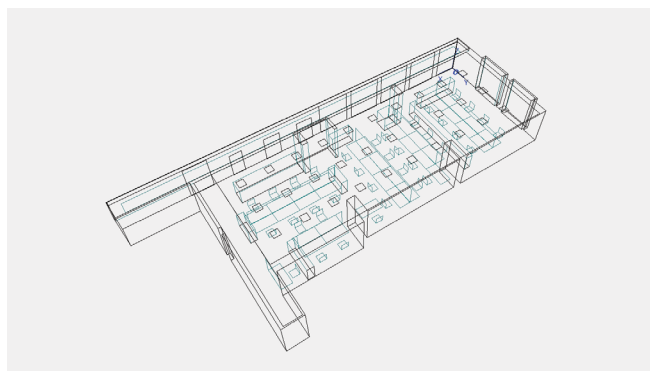
rach zastosowano materiał dźwiękochłonny typu B; analogicznym rozwiązaniem byłoby zachowanie liczby punktów świetlnych ze zmniejszeniem ich powierzchni do ok. 20%),

- pokryciu drewnianej powierzchni ekranów akustycznych materiałem dźwiękochłonnym typu E (ryc. 2),
- zwiększeniu wysokości ekranów dźwiękochłonnych z 1,1 m do 2,1 m,
- zastosowaniu źródeł maskujących sygnały mowy, o poziomie dźwięku A w punktach obliczeń 38 dB (rzeczywiste tło akustyczne miało poziom dźwięku A wynoszący 32,8 dB (ryc. 4)).

Wśród tych modyfikacji na komentarz zasługuje podniesienie poziomu dźwięku A wypadkowego hałasu tła. Rozwiązanie to powoduje wzrost hałasu w pomieszczeniu, co zwykle należy oceniać negatywnie. Biorąc jednak pod uwagę korzyści takiego rozwiązania, polegające na maskowaniu niepożądanego sygnału mowy, oraz kontrolując jego poziom dźwięku A w taki sposób, żeby nie przekroczył przyjętego poziomu dopuszczalnego [16] (dla pomieszczeń administracyjnych bez wewnętrznych źródeł hałasu – 40 dB), należy to rozwiązanie wziąć pod uwagę.

WYNIKI

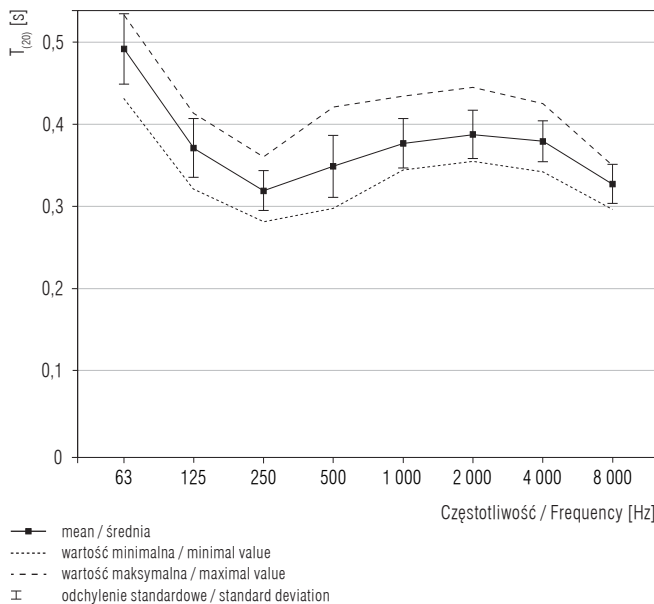
W tabeli 3. podano wybrane wyniki badań parametrów kryterialnych dla różnych rozwiązań adaptacji akustycznych i różnych poziomów dźwięku A hałasu maskującego sygnał mowy. Na rycinach 8–13. przedstawiono wyniki symulacji cyfrowej pomieszczenia dla 7. wariantu adaptacji akustycznej (tab. 3).



Wariant 7 – jak w tabeli 3 / Variant 7 – as in Table 3.

Ryc. 8. Widok badanego pomieszczenia biurowego typu open space po adaptacji akustycznej w wariantie 7., wygenerowany w programie ODEON

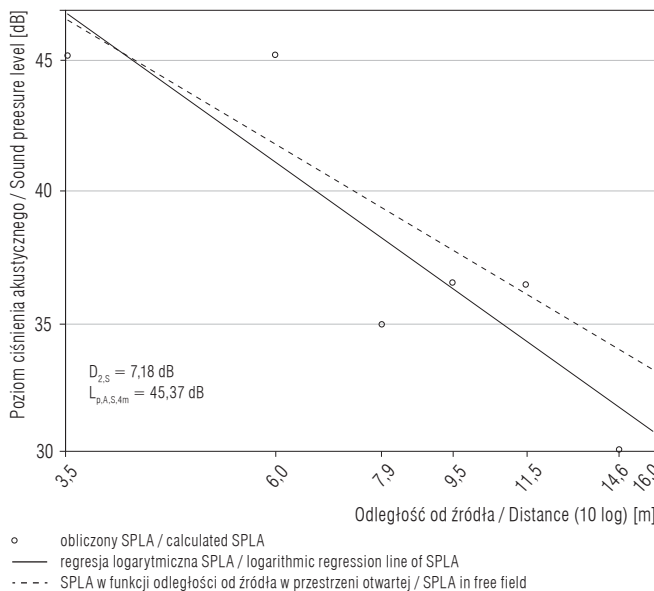
Fig. 8. View of the examined open plan office after acoustic treatment in variant 7, generated in the ODEON program



Wariant 7 – jak w tabeli 3 / Variant 7 – as in Table 3.
 $T_{(20)}$ – czas pogłosu / reverberation time.

Ryc. 9. Czas pogłosu badanego pomieszczenia biurowego typu open space po adaptacji akustycznej w wariantie 7. (wyniki symulacji cyfrowej w programie ODEON)

Fig. 9. Reverberation time of the examined open plan office after acoustic treatment in variant 7 (results of digital simulation in the ODEON program)



Wariant 7 – jak w tabeli 3 / Variant 7 – as in Table 3.
 Skróty jak tabeli 1 / Abbreviations as in Table 1.

Ryc. 10. Poziom dźwięku A w funkcji odległości od źródła mowy w badanym pomieszczeniu biurowym typu open space po adaptacji akustycznej w wariantie 7. (wyniki symulacji cyfrowej w programie ODEON)

Fig. 10. A-weighted sound pressure level in function of the distance from speech source in the examined open plan office after acoustic treatment in variant 7 (results of digital simulation in the ODEON program)

Tabela 3. Symulacja cyfrowa wybranych parametrów kryteriálních dla różnych rozwiązań adaptacji akustycznej i maskowania sygnałów mowy o różnych poziomach dźwięku A w pomieszczeniu biurowym typu open space
Table 3. Digital simulation of chosen criteria parameters for different solutions of acoustic treatment and masking speech signals with different A-weighted sound pressure levels in open plan office

Wariant Variant	Elementy adaptacji akustycznej Elements of acoustic treatment				Parametr kryteriálny Parameter criteria													
	podwieszany suspended	sufit ceiling	ekran akustyczny acoustic screen	kasetony oświetleniowe i wentylacyjne panels of lamps and ventilation	$L_{A,back}$ [dB]	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	T^m	r^j [m]	r^p [m]	D_{25} [dB]	$L_{p,A,5m}$ [dB]
Wymagania / Requirements	nd.	nd.	nd.	nd.	nd.	-	-	-	< 0,43	< 0,43	< 0,43	-	-	< 0,43	≤ 5	-	≥ 7	≤ 48
Przed adaptacją akustyczną / Before acoustic treatment	C*	-	drewno / / wood	147	32,8	0,48	0,42	0,43	0,51	0,54	0,56	0,55	0,43	0,54	10,98	20,94	6,52	50,97
Po adaptacji akustycznej / After acoustic treatment	B*	B*	E*	147	32,8	0,47	0,39	0,41	0,49	0,53	0,53	0,50	0,39	0,52	10,89	20,59	6,67	50,93
wariant 1 / variant 1	B*	B*	E*	147	32,8	0,46	0,37	0,34	0,39	0,41	0,43	0,43	0,36	0,41	9,75	20,32	5,17	46,51
wariant 2 / variant 2	B*	B*	E*	30	32,8	0,50	0,37	0,33	0,36	0,41	0,41	0,41	0,33	0,39	9,61	20,74	5,55	46,25
wariant 3 / variant 3	B*	B*	E*	30	32,8	0,48	0,37	0,32	0,37	0,40	0,40	0,39	0,33	0,39	8,35	16,81	6,85	45,39
wariant 4 / variant 4	B*	B*	E*	30	32,8	0,49	0,37	0,32	0,35	0,38	0,39	0,38	0,33	0,37	8,09	16,13	7,18	45,37
wariant 5 / variant 5	B*	B*	E*	30	37,0**	0,49	0,37	0,32	0,35	0,38	0,39	0,38	0,33	0,37	5,10	13,24	7,18	45,37
wariant 6 / variant 6	B*	B*	E*	30	38,0**	0,49	0,37	0,32	0,35	0,38	0,39	0,38	0,33	0,37	4,32	12,58	7,18	45,37
wariant 7 / variant 7	B*	B*	E*	30	38,0**	0,49	0,37	0,32	0,35	0,38	0,39	0,38	0,33	0,37	4,32	12,58	7,18	45,37

$L_{A,back}$ – poziom dźwięku A tła akustycznego / A-weighted sound pressure level of background noise.

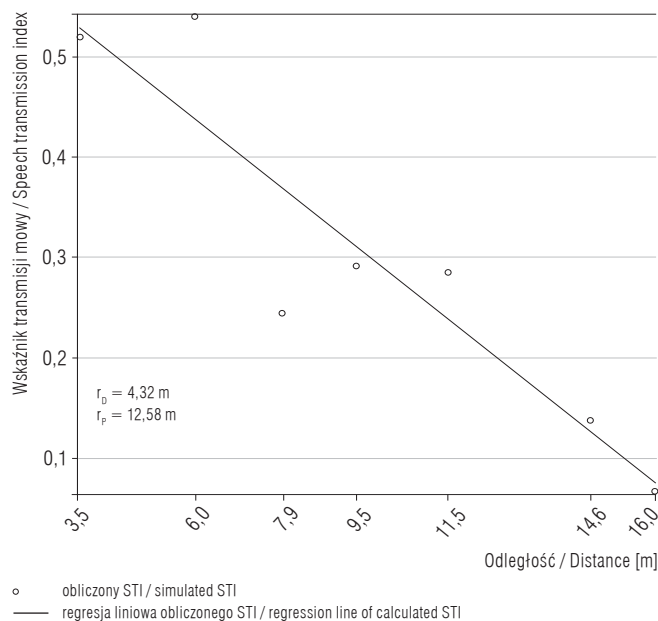
nd. – nie dotyczy / not applicable.

Pozostałe skróty jak w tabeli 1 i rycinie 2 / Other abbreviations as in Table 1 and Figure 2.

Ciemnoszary – nie spełnia kryterium / not meeting criteria, jasnoszary – spełnia kryterium / meeting criteria.

* jak na rycinie 2 / As in Figure 2.

** Podobny jak na rycinie 10 / Similar to Figure 10.



Wariant 7 – jak w tabeli 3 / Variant 7 – as in Table 3.

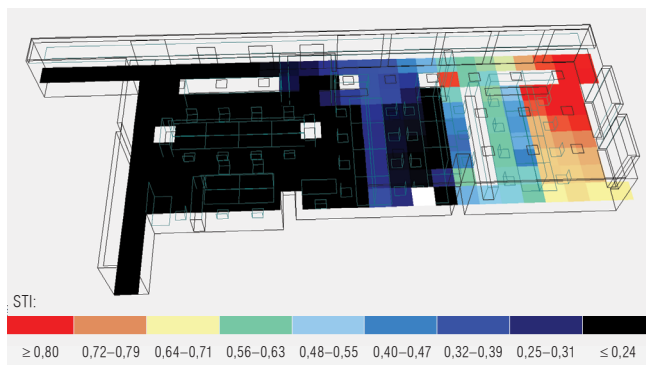
Skróty jak tabeli 1 / Abbreviations as in Table 1.

Ryc. 11. Wskaźnik transmisji mowy (STI) w funkcji odległości od źródła mowy w badanym pomieszczeniu biurowym typu open space po adaptacji akustycznej w wariantcie 7. (wyniki symulacji cyfrowej w programie ODEON)

Fig. 11. Speech transmission index (STI) in function of the distance from speech source in the examined open plan office after acoustic treatment in variant 7 (results of digital simulation in the ODEON program)

OMÓWIENIE

W tabeli 3. podano wybrane wyniki badań symulacji cyfrowych pomieszczenia z uwzględnieniem różnych elementów adaptacji akustycznej i różnych poziomów dźwięku A sygnałów maskujących dźwięki mowy. Ich kolejność nie jest przypadkowa. W 1. kroku modernizacji pomieszczenia wymieniono materiał dźwiękochłonny stosowany w dźwiękochłonnych sufitach podwieszanych (z typu C na typ B, tj. na materiał o większym współczynniku pochłaniania dźwięku w paśmie częstotliwości 500 Hz względem innych częstotliwości (ryc. 2)), uwzględniono dodatkowy dźwiękochłonny sufit podwieszany (typu B) i pokryto ekrany akustyczne materiałem dźwiękochłonnym (typu E (ryc. 2)). Działania te, zgodnie z przypuszczeniami, tylko nieznacznie wpłynęły na zbliżenie wartości rozpatrywanych parametrów do wartości kryterialnych. Pomogły one jednak usunąć z pomieszczenia typowe błędy projektów akustycznych (np. stosowanie ekranów akustycznych o zbyt małej chłonności akustycznej), co przy rozpatrywaniu dalszych modyfikacji pomieszczenia pozwoliło wyraźniej obserwować wpływ ich stosowania.

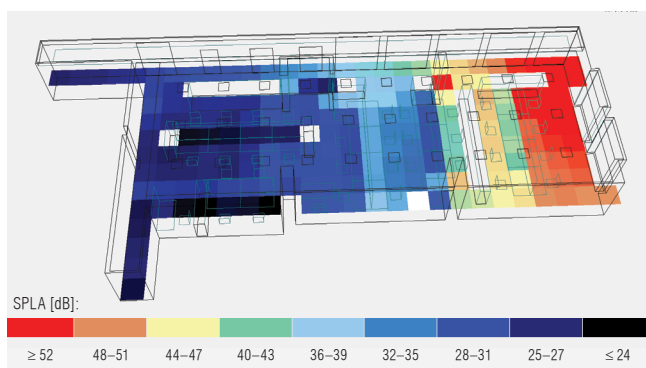


Wariant 7 – jak w tabeli 3 / Variant 7 – as in Table 3.

Rycina w kolorze / Colorful figure: <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00574>.

Ryc. 12. Rozkład wskaźnika transmisji mowy (STI) w badanym pomieszczeniu biurowym typu open space po adaptacji akustycznej w wariantcie 7. (wyniki symulacji cyfrowej w programie ODEON)

Fig. 12. Distribution of speech transmission index (STI) in the examined open plan office after acoustic treatment in variant 7 (results of digital simulation in the ODEON program)



Wariant 7 – jak w tabeli 3 / Variant 7 – as in Table 3.

Rycina w kolorze / Colorful figure: <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00574>.

Ryc. 13. Rozkład dźwięku A mowy (SPLA) w badanym pomieszczeniu biurowym typu open space po adaptacji akustycznej w wariantcie 7. (wyniki symulacji cyfrowej w programie ODEON)

Fig. 13. Distribution of A-weighted sound pressure level (SPLA) of speech in the examined open plan office after acoustic treatment in variant 7 (results of digital simulation in the ODEON program)

W następnej symulacji uwzględniono podwyższenie ekranów akustycznych (do wysokości 1,5 m od podłogi). Jak widać, rozwiązanie to pozwala spełnić kryteria dla czasu pogłosu (częstotliwości 500 Hz i 1000 Hz i T_{mf}) oraz poziomu dźwięku A mowy w odległości 4 m od źródła. Podwyższanie ekranu akustycznego jest więc dobrym rozwiązaniem i istotnym krokiem w pożądanym kierunku.

Następnie przeanalizowano zasadność stosowania tak dużej liczby punktów świetlnych. Ponieważ zdol-

ność do pochłaniania dźwięku zawierających te punkty kasetonów jest dużo mniejsza niż materiału dźwiękochłonnego zastosowanego w suficie podwieszanym, ich wpływ na warunki akustyczne w pomieszczeniu jest negatywny. Z tego powodu przeprowadzono analizę oświetlenia, która wykazała, że w tym pomieszczeniu wystarczy łącznie 30 kasetonów oświetleniowych i wentylacyjnych (nie zmniejszono liczby paneli wentylacyjnych).

W miejsce zbędnych kasetonów uwzględniono sufit podwieszany z materiałem dźwiękochłonnym typu B. Rozwiązanie to bardzo poprawiło warunki akustyczne w pomieszczeniu. Spełniono kryterium na czas pogłosu (we wszystkich ocenianych pasmach częstotliwości) oraz – jak poprzednio – na poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m od źródła. Prowadzi to do oczywistego wniosku, że dźwiękochłonny sufit podwieszany jest podstawowym środkiem poprawy warunków akustycznych w pomieszczeniu. Bardzo istotne jest jednak to, żeby pokrywał on możliwie całą powierzchnię sufitu, a także to, że wszelkie instalacje będą pogarszały jego efektywność akustyczną.

Ponieważ niniejszy artykuł dotyczy aspektu akustycznego, pominięto rozważania dotyczące uzyskania odpowiedniego oświetlenia, wentylacji, jak również aspektów technicznych, np. obciążenia stropu kasetonami dźwiękochłonnymi.

Na tym etapie rozważań pozostały niespełnione dwa kryteria – na spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości od źródła mowy i na odległość rozproszenia (nie ma kryterium wartości odległości prywatności (tab. 1), ale dobrze jest obserwować trend wartości tego parametru).

W tym miejscu można zaproponować różne rozwiązania. Celem niniejszej pracy było potwierdzenie tezy o możliwości uzyskania określonych warunków, skorzystano więc z najprostszej metody (podobnie jak zrobili to inni badacze [9]) przez podwyższenie ekranów akustycznych. (Przy rozpatrywaniu ekranów w pomieszczeniu trzeba mieć na uwadze wiele różnych uwarunkowań. W rozważanym przypadku ekran akustyczny, ze względów wentylacyjnych, nie powinien być wyższy niż 2,8 m). Po zwiększeniu ich wysokości do 2 m widać korzystny, ale jeszcze niewystarczający efekt. Dopiero zwiększenie ich wysokości do 2,1 m pozwala spełnić kryterium na spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości od źródła mowy. Mimo pozytywnego trendu malejącego nadal 1 kryterium – na odległość rozproszenia – pozostaje niespełnione. Radykalnym sposobem poprawienia tego

stanu jest wprowadzenie hałasu maskującego dźwięki mowy.

W poprzednich symulacjach uwzględniano rzeczywiste tło akustyczne o poziomie dźwięku A wynoszącym 32,8 dB (ryc. 4). Wprowadzenie standardowe (typu NC wg ODEON) tła akustycznego o poziomie dźwięku A wynoszącym 38 dB pozwala spełnić kryterium na odległość rozproszenia, a w konsekwencji – wszystkich kryteriów. W tym miejscu trzeba zauważyć, że tło akustyczne o podobnym widmie akustycznym i poziomie dźwięku A o 1 dB mniejszym nie jest wystarczające. Jednocześnie – jak wspomniano wcześniej – hałas tła o poziomie dźwięku A wynoszącym 38 dB jest o 2 dB mniejszy niż dopuszczalny określony w normie [16], a więc można to rozwiązanie zaakceptować. Wprowadzenie dodatkowego hałasu w pomieszczeniu może się wydać rozwiązaniem radykalnym. Niestety, rozpatrując wpływ różnych czynników na warunki akustyczne określone odległościami rozproszenia i prywatności, można zauważyć, że to właśnie hałas maskujący dźwięki mowy ma na nie największy, a w niektórych przypadkach jedyny, wpływ. Celowe jest więc ich stosowanie, jednak w taki sposób, żeby nie zwiększały uciążliwości pracy (określonej w [16]). Subiektywny efekt maskowania sygnałów niepożądanych sygnałami niepowodującymi uciążliwości jest powszechnie znany, a nawet powszechnie wykorzystywany w środowisku pracy i życia.

Reasumując, wymienione adaptacje akustyczne i źródło maskujące sygnał mowy zapewniają uzyskanie odpowiednich warunków akustycznych w pomieszczeniu biurowym open space.

WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań metodą symulacji cyfrowej obiektu rzeczywistego (w programie komputerowym ODEON) pozwalają stwierdzić, że metodami adaptacji akustycznej pomieszczenia i wprowadzeniem sygnału maskującego sygnał mowy możliwe jest uzyskanie odpowiednich warunków pracy w pomieszczeniach biurowych open space (warunki te określono w PN-EN ISO 3382-3:2012). Jednocześnie należy stwierdzić, że uzyskanie takich warunków wymaga daleko idących modyfikacji obecnie eksploatowanych pomieszczeń. Stosunkowo najprościej osiągnąć odpowiednio krótki czas pogłosu. Istotne jest także to, że na podstawie badanego przypadku można stwierdzić, że maksymalny czas pogłosu tego typu pomieszczeń powinien wynosić ok. 0,4 s (która to wartość do-

puszczalna jest podana tylko w nielicznych publikacjach).

Najważniejszym koniecznym, ale niedostatecznym, sposobem modyfikacji akustycznej pomieszczeń jest zastosowanie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego pokrywającego jak największą powierzchnię sufitu (w tym stosowanie lamp o małej powierzchni osłon). Ważne, żeby sufit zapewniał największą chłonność akustyczną pomieszczenia w pasmach częstotliwości 500 Hz i 2000 Hz (a więc też współczynnik pochłaniania dźwięku zastosowanych materiałów), co wymaga podwieszenia sufitu na jak największym dystansie (nie mniejszym niż 30 cm od sufitu). Kolejnym istotnym elementem jest stosowanie dźwiękochłonnych ekranów akustycznych o jak największym współczynniku pochłaniania dźwięku powierzchni i (co jest trudne technicznie do wykonania) o dużych wysokościach – ok. 2 m. Stosowanie niższych ekranów powoduje konieczność przyjęcia dalej idących rozwiązań adaptacji akustycznej. (Wysokość ta wydaje się duża z punktu widzenia obecnej praktyki, jednak w niektórych pomieszczeniach jest już stosowana. Ze względu na przepisy odległość ekranu od stropu nie może być mniejsza niż 0,2 m).

Ostatnim elementem, bez którego prawdopodobnie nie uzyska się zadawalających warunków akustycznych (w szczególności parametrów odległości rozproszenia i odległości prywatności), jest stosowanie sygnałów maskujących. W tym przypadku trzeba jednak zadbać o to, żeby wypadkowe tło akustyczne (włącznie z sygnałem maskującym) nie przekroczyło dopuszczalnego poziomu dźwięku A hałasu tła w pomieszczeniu. Maskowanie dźwięków przeszkadzających w pracy dźwiękami maskującymi nieabsorbującymi pracowników jest powszechnie postrzegane pozytywnie, choć jako rozwiązanie nowe budzi pewien niepokój. Kiedy ograniczy się poziom dźwięku A dźwięków maskujących do 40 dB, wypadkowy hałas nie tylko nie przekracza poziomów dopuszczalnych, ale jest też znacznie mniejszy od poziomów dźwięku A mowy wynoszących 60–65 dB (dla porównania jest zbliżony do hałasu pochodzącego od chłodziarek domowych). Dźwięki maskujące będą więc wpływały na zmniejszenie uciążliwości (oczywiście sygnał maskujący musi być odpowiednio dobrany).

W niniejszym artykule skupiono się na uwarunkowaniach akustycznych osiągnięcia odpowiednich warunków pracy poprzez zastosowane środków technicznych. W rzeczywistym projekcie konieczne jest jednocześnie uwzględnienie innych uwarunkowań rozpatrywanych środków technicznych. Służą one zapewnieniu

pozostałych warunków środowiska pracy, takich jak odpowiednie oświetlenie, wentylacja i mikroklimat czy ergonomia. Dodatkowo zaproponowane rozwiązania techniczne muszą być zgodne z wieloma przepisami określającymi np. minimalny prześwit nad ekranem czy minimalną szerokość drogi komunikacyjnej. Ponadto muszą być one możliwe do zastosowania praktycznego, co np. w przypadku dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego wymusza odpowiednią wytrzymałość stropu na dodatkowe obciążenie. Wszystkie te aspekty stanowią całość, którą trzeba uwzględnić w projekcie adaptacji pomieszczenia. W niniejszej pracy skupiono się tylko na aspekcie akustycznym, ponieważ jest on zwykle pomijany przy projektowaniu pomieszczeń pracy.

PODZIĘKOWANIA

Autor dziękuje pani mgr inż. Izabeli Warmiak oraz panu Jerzemu Kozłowskiemu za pomoc w wykonaniu pomiarów.

PIŚMIENNICTWO

1. PN-EN ISO 3382-3:2012. Akustyka – pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń. Część 3. Pomieszczenia biurowe „open space”. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012
2. 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. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2015
3. Evans G.W., Johnson D.: Stress and open-office noise. *J. Appl. Psychol.* 2000;85(5):779–783, <https://doi.org/10.1037/0021-9010.85.5.779>
4. Mikulski W.: Warunki akustyczne w pomieszczeniach biurowych open space – wyniki badań pilotażowych. *Med. Pr.* 2016;67(5):653–662, <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00425>
5. PN-EN ISO 3382-2:2010. Akustyka – pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń. Część 2. Czas pogłosu w zwykłych pomieszczeniach. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2010
6. PN-B-02151-3:2015-10. Akustyka budowlana – ochrona przed hałasem w budynkach. Część 3. Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i elementów budowlanych. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2015
7. PN-EN 60268-16:2011. Urządzenia systemów elektroakustycznych. Część 16. Obiektywna ocena zrozumiałości mowy za pomocą wskaźnika transmisji mowy. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2011

8. Mikulski W., Warmiak I.: Obiektywne kryteria oceny właściwości akustycznych otwartych pomieszczeń biurowych. *Bezpiecz. Pr.* 2015;11:18–21
9. Hongisto V.: ISO 3382-3: Backgrounds and contents. Case results from various kinds of acoustic refurbishments. Seminarium: Projekty akustyczne nowoczesnych biur typu open space – norma PN-EN ISO 3382-3 w praktyce. Materiały szkoleniowe, Warszawa 2016
10. Virjonen P., Keränen J., Hongisto V.: Determination of acoustical conditions in open-plan offices: Proposal for new measurement method and target values. *Acta Acust. United Acust.* 2009;95:279–290, <https://doi.org/10.3813/AAA.918150>
11. Keränen J.: Measurement and prediction of the spatial decay of speech in open plan offices [praca doktorska]. Aalto University, Aalto 2015
12. Rindel J.H., Christensen C.L.: Acoustical simulation of open-plan offices according to ISO 3382-3. Seminarium: Projekty akustyczne nowoczesnych biur typu open space – norma PN-EN ISO 3382-3 w praktyce. Materiały szkoleniowe, Warszawa 2016
13. Rindel J.H., Christensen C.L.: Acoustical simulation of open-plan offices according to ISO 3382-3. Proceedings of the Euronoise; 10–13 czerwca 2012; Praga, Czechy [Internet]: European Accoustic Association [cytowany 1 września 2016]. Adres: https://www.researchgate.net/publication/276281022_Acoustical_simulation_of_open-plan_offices_according_to_ISO_3382-3
14. Rindel J.H.: Prediction of acoustical parameters for open plan offices according to ISO 3382-3. Proceedings of the Acoustics; 13–18 maja 2012; Hong Kong, Chiny [Internet]: Acoustics, Hong Kong 2012 [cytowany 28 września 2017]. Adres: http://www.odeon.dk/pdf/C115-ACOUSTIC_2012_paper_3aAA_Rindel.pdf
15. Keränen J.: Measurement and prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices [praca doktorska]. Aalto University, Aalto 2015
16. PN-87/B-02151/02. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2011