

OCENA W SKALI TRZYSTOPNIOWEJ WŁAŚCIWOŚCI AKUSTYCZNYCH BIUROWEGO POMIESZCZENIA OPEN SPACE O DUŻEJ KUBATURZE – OPIS PRZYPADKU

AN ASSESSMENT OF ACOUSTIC PROPERTIES OF A LARGE-CAPACITY OPEN-PLAN OFFICE ROOM ACCORDING TO A 3-LEVEL RATING SCALE – A CASE STUDY

Witold Mikulski

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

STRESZCZENIE

Wstęp: W biurowych pomieszczeniach open space jedną z podstawowych przyczyn uciążliwości pracy jest hałas rozmów pracowników. W celu jego ograniczenia określono dopuszczalne wartości wielkości charakteryzujących właściwości akustyczne w tych pomieszczeniach w skali dwustopniowej. **Materiał i metody:** W artykule wprowadzono trzystopniową skalę oceny właściwości akustycznych pomieszczenia (złe, słabe, dobre) bazującą na wielkościach oceny według PN-B-02151-4:2015 oraz PN-EN ISO 3382-3:2012 – kryterium I. Określono dodatkowo nowe, także trzystopniowe, II kryterium oceny dotyczące separacji akustycznej między grupami stanowisk pracy. W celu jego spełnienia konieczne jest uwzględnienie adaptacji akustycznej pomieszczenia. Podano wyniki badania metodami symulacji obliczeniowej wielowariantowej (7) adaptacji akustycznej w pomieszczeniu trzynawowym. **Wyniki:** Wymagania PN-B-02151-4:2015 (kryterium I) zostały spełnione po zastosowaniu: dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego i ekranów akustycznych przy stanowiskach pracy. Do spełnienia wymagań PN-EN ISO 3382-3:2012 (kryterium I) konieczne było dodatkowo uwzględnienie materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia oraz ekranów akustycznych rozdzielających nawy pomieszczenia. Do spełnienia wymagań kryterium II konieczne okazało się dodatkowe zastosowanie ekranów akustycznych rozdzielających grupy stanowisk pracy oraz ekranów akustycznych w ciągach komunikacyjnych dla pieszych. **Wnioski:** Jest możliwe uzyskanie odpowiednich właściwości akustycznych w pomieszczeniach biurowych open space. Wymagania określone zgodnie z PN-B-02151-4:2015 można spełnić przy znacznie mniejszej adaptacji akustycznej niż wymagania PN-EN ISO 3382-3:2012. Zastosowanie trzystopniowej skali oceny właściwości akustycznych pomieszczenia pozwala w bardziej precyzyjny sposób różnicować je pod względem ich właściwości akustycznych. Wprowadzenie nowego sposobu oceny, uwzględniającego grupowanie stanowisk pracy w pomieszczeniu, pozwala w bardziej miarodajny sposób oceniać właściwości akustyczne przez pominięcie wpływu na ocenę obszarów, w których nie przebiega praca. Med. Pr. 2021;72(4):375–390

Słowa kluczowe: akustyka pomieszczeń, promień rozproszenia, separacja zrozumiałej mowy, spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości, wskaźnik transmisji mowy, STI

ABSTRACT

Background: In open-plan office rooms, one of the main reasons for the nuisance of work is the noise from employees' conversations. In order to limit it, the permissible values of the parameters characterizing the acoustic properties in those rooms on a 2-level scale are defined. **Material and Methods:** The article introduces a 3-level scale for assessing the acoustic properties (bad, fair, good) of a room based on EN ISO 3382-3:2012 and PN-B-02151-4:2015 – criterion 1. Additionally and alternatively, a new 3-level scale assessment criterion (criterion 2), concerning acoustic separation between groups of workstations, was determined. In order to meet that criterion, it is necessary to take into account the acoustic treatment of the room. A multivariate (7) acoustic treatment studies were performed using computational simulation methods. **Results:** Requirements, according to PN-B-02151-4:2015, were met after the application of a sound-absorbing suspended ceiling and acoustic screens at workplaces. To meet the requirements of EN ISO 3382-3:2012, it was necessary to additionally use sound-absorbing materials on the walls and acoustic screens separating the naves of the room. To meet the requirements of criterion 2, it was necessary to additionally use acoustic screens separating groups of workstations and acoustic screens in passages. **Conclusions:** Appropriate acoustic properties can be obtained in open-space offices. The requirements according to PN-B-02151-4:2015 can be met with much lower acoustic treatment than the requirements according to EN ISO 3382-3:2012. The use of a 3-level scale for assessing the acoustic properties of a room allows for the differentiation of rooms with regard to their acoustic properties. The introduction of a new assessment method, taking into account the grouping of workplaces in a room, makes it possible to assess the acoustic properties of a room in a more reliable way, by neglecting the impact on the assessment of areas where people are not present. Med. Pr. 2021;72(4):375–90

Key words: room acoustic, distraction distance, intelligible speech separation, spatial decay rate of speech, speech transmission index, STI

Autor do korespondencji / Corresponding author: Witold Mikulski, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, e-mail: wimik@ciop.pl
Nadesłano: 13 stycznia 2021, zatwierdzono: 16 kwietnia 2021

WSTĘP

Hałas to każdy niepożądany dźwięk, który może być uciążliwy, szkodliwy dla zdrowia lub zwiększać ryzyko wypadku przy pracy. W środowisku pracy określone są dopuszczalne wartości poziomu hałasu ze względu na ochronę słuchu i możliwość realizacji przez pracownika podstawowych zadań. Te pierwsze określone są w Rozporządzeniu Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. (dopuszczalna wartość poziomu ekspozycji na hałas odniesionego do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy lub przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy wynosząca 85 dB, dopuszczalna wartość maksymalnego poziomu dźwięku A wynosząca 115 dB oraz dopuszczalna wartość szczytowego poziomu dźwięku C wynosząca 135 dB) [1]. Natomiast dopuszczalna wartość poziomu hałasu ze względu na możliwość realizacji przez pracownika podstawowych zadań określona jest w PN-N-01307:1994 (np. na stanowiskach pracy biurowej, od wszystkich źródeł hałasu łącznie – w tym i od rozmów pracowników – dopuszczalny równoważny poziom dźwięku A jest równy 55 dB) [2]. Na stanowiskach pracy w biurowych pomieszczeniach open space powyższe dopuszczalne poziomy hałasu nie są przekroczone, np. w większości przypadków równoważny poziom dźwięku A zawiera się w zakresie 45–53 dB [3].

Uciążliwość hałasu na stanowiskach pracy biurowej może być również powodowana dźwiękami urządzeń stanowiących wyposażenie techniczne budynku. W normie PN-B-02151-2:2018 [4] (wcześniejsza wersja tej normy to PN-B-02151-02:1987, która jest przywołana w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 14 listopada 2017 r. [5]), podane są wartości wzorcowego maksymalnego (najwyższego dopuszczalnego) poziomu dźwięku A w pomieszczeniach, np. w biurowych pomieszczeniach open space wynosi ona 40 dB. Dopuszczalny poziom hałasu od technicznego wyposażenia budynku należy określić indywidualnie dla każdego pomieszczenia z wartości wzorcowego maksymalnego poziomu dźwięku A dla rozpatrywanego pomieszczenia po uwzględnieniu poprawki wynikającej z jego chłonności akustycznej. Dla typowych biurowych pomieszczeń open space wartości tej poprawki wynoszą 1–5 dB [6], a wówczas dopuszczalny

poziom dźwięku A tego hałasu będzie dotyczyć zakresu 35–39 dB. Ten rodzaj hałasu w biurowych pomieszczeniach open space również nie przekracza poziomu dopuszczalnego [np. według badań autora przeprowadzonych w kilkunastu biurowych pomieszczeniach open space średnia wartość poziomu dźwięku A tego hałasu wynosi 33,3 dB (SD = 5,9 dB) [7,8]].

Podsumowując: w biurowych pomieszczeniach open space poziomy dźwięku nie przekraczają poziomów dopuszczalnych hałasu. Dlatego główną przyczyną uciążliwości dźwięków mowy nie jest ich poziom, a fakt, że powodując niezamierzoną percepcję mowy, absorbują uwagę pracowników nieuczestniczących w rozmowach [6,9–15]. Z tego powodu wyróżnia się: 1) hałas od rozmów, których treść jest zrozumiała, a niepożądana przez osoby, które nie biorą w niej udziału, oraz 2) hałas od wszystkich innych źródeł, w tym i od rozmów, których treść jest przez odbiorcę niezrozumiała (tzw. gwar rozmów, *bubble noise*). Wynika z tego, że *bubble noise*, zmniejszając zrozumiałość mowy dźwięków niepożądanych, może zmniejszyć uciążliwość hałasu – oczywiście w zakresie poziomów dźwięku A występujących hałasów w biurowych pomieszczeniach open space. Na zrozumiałość mowy w pomieszczeniu mają wpływ warunki propagacji dźwięku, które zależą od właściwości akustycznych pomieszczenia [8,15–17]. Dlatego w biurowych pomieszczeniach open space poza ww. ograniczeniami poziomu hałasu konieczne jest także uzyskanie odpowiednich właściwości akustycznych pomieszczeń, m.in. przez zastosowanie ich adaptacji akustycznej [8,15–27]. Wymagania odnoszące się do właściwości akustycznych pomieszczeń podane są w 2 normach: PN-B-02151-4:2015 [23] – norma o statusie obowiązkowym, przywołana w rozporządzeniu [5] – oraz PN-EN ISO 3382-3:2012 [19], norma o statusie dobrowolnym.

W normie PN-B-02151-4:2015 [23] podane są wymagania tzw. minimalnych właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space charakteryzowane wielkością minimalna chłonność akustyczna pomieszczenia (w artykule stanowią one część pierwszą kryterium I oceny akustycznej pomieszczenia). W pomieszczeniach biurowych open space wartość minimalna chłonności akustycznej pomieszczenia [m^2] w 3 oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach

środkowych 500, 1000 i 2000 Hz, jest równa 110% wartości pola powierzchni rzutu pomieszczenia w m². Wartość ta jest wartością graniczną oceny akustycznej między złymi (niewystarczającymi), a słabymi (dostatecznymi) właściwościami akustycznymi biurowego pomieszczenia open space.

W normie PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] właściwości akustyczne pomieszczenia charakteryzuje się poprzez określenie zmian wartości wskaźnika transmisji mowy STI (*speech transmission index*) oraz poziomu dźwięku A mowy w funkcji odległości od wzorcowego źródła mowy (w artykule stanowią one część drugą kryterium I oceny akustycznej pomieszczenia). Właściwości akustyczne pomieszczenia określa się 4 wielkościami. Dla 3 z nich w normie PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] określone są kryteria dla tzw. dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia: promień rozproszenia $r_D \leq 5$ m, poziom dźwięku A w odległości 4 m $L_{p,A,S,4m} \leq 48$ dB oraz spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości (różnica poziomów dźwięku A w odległości 1 i 2 m od wzorcowego źródła mowy) $D_{2,s} \geq 7$ dB. W normie PN-EN ISO 3382-3:2012 nie podano kryterium dla czwartej wielkości promienia prywatności r_p . W artykule wartości graniczne wskazane w tych kryteriach są wartościami granicznymi między tzw. właściwościami słabymi (dostatecznymi) i dobrymi oceny akustycznej pomieszczeń. W normie PN-EN ISO 3382-3:2012 podane są także typowe w eksploatowanych biurowych pomieszczeniach open space wartości tych wielkości dla tzw. niedostatecznych właściwości akustycznych pomieszczenia (dalej określane w artykule złymi właściwościami akustycznymi). Kryteria złych właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space są następujące: promień rozproszenia $r_D > 10$ m, poziom dźwięku A w odległości 4 m $L_{p,A,S,4m} > 50$ dB oraz spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości $D_{2,s} < 5$ dB.

Bazując na ww. kryterium I (części pierwsza i druga) oraz wartościach typowych tych wielkości w obecnych eksploatowanych biurowych pomieszczeniach open space [12,15,27] przyjęto metodę oceny właściwości akustycznych pomieszczenia, stosując skalę trzystopniową (złe, słabe, dobre właściwości akustyczne). Przyjmując takie kryterium oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń open space, podano wyniki badań obliczeniowych właściwości akustycznych bardzo dużego, trzynawowego biurowego pomieszczenia open space. Celem badań było znalezienie takiej konfiguracji różnych elementów adaptacji akustycznej w tym pomieszczeniu, która pozwoliła uzyskać według kryterium I dobre właściwości akustyczne pomieszczenia.

Ponieważ podczas badań konieczne było uwzględnienie przenikania dźwięków mowy ciągami pieszymi między nawami pomieszczenia (czego dotychczas nie rozpatrywano), opracowano nowe kryterium oceny właściwości akustycznych pomieszczeń, kryterium II, bazujące na uzyskaniu odpowiedniej separacji akustycznej między grupami stanowisk pracy. Zastosowano w nim również trzystopniową skalę oceny właściwości akustycznych pomieszczenia (złe, słabe, dobre) na podstawie innych wielkości niż w kryterium I, tj. poziom dźwięku A i wskaźnik transmisji mowy STI.

MATERIAŁ I METODY

Charakterystyka rozpatrywanego obiektu badań

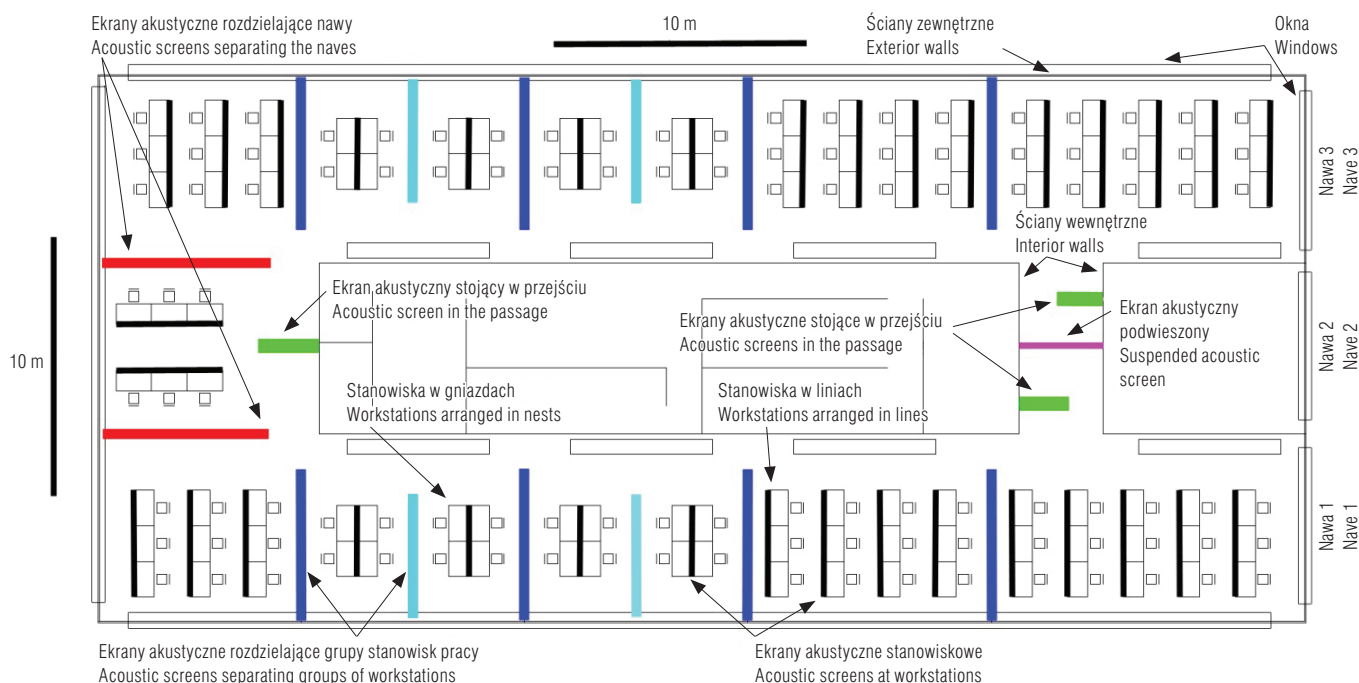
Badanie przeprowadzono w trzynawowym biurowym pomieszczeniu open space o bardzo dużej kubaturze $V \approx 2750$ m³. Pole powierzchni podłogi $S_p \approx 785$ m², a wysokość pomieszczenia $H = 3,5$ m (rycina 1). W pomieszczeniu znajdowało się 110 stanowisk pracy biurowej.

Kryteria oceny akustycznej

Jak podano we wstępie, łącząc kryteria oceny minimalnych właściwości akustycznych PN-B-02151-4:2015 [23] i dobrych właściwości akustycznych PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] oraz interpolując wyniki badań własnych właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń open space, otrzymano – i w artykule dalej zastosowano – trzystopniowe kryterium I oceny właściwości akustycznych pomieszczenia, ujęte w tabeli 1 [12,15,27].

Metody określania wielkości charakteryzujących właściwości akustyczne pomieszczenia określone są w: PN-B-02151-4:2015 [23] (chłonność akustyczna pomieszczenia), PN-EN ISO 3382-2:2010 [28] (czas pogłosu pomieszczenia), PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] (promień rozproszenia, poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m i spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości) oraz PN-EN 60268-16:2011 [25] (wskaźnik transmisji mowy STI).

Szczegółnej uwagi wymaga określenie właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń open space o dużej kubaturze, oraz pomieszczeń, w których stanowiska pracy są rozdzielone obszarami bez stanowisk. Wynika to z istoty stosowanych zgodnie z PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] kryteriów oceny bazujących na: poziomie dźwięku A mowy w odległości 4 m, spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości i promienia rozproszenia. W metodzie dane uwzględniane są z obszaru w odległości od wzorcowego źródła mowy < 16 m, co powoduje, że charakteryzują one właściwości akustyczne



Rycina 1. Rzut rozpatrywanego pomieszczenia z ostatnim (7) wariantem adaptacji akustycznej
Figure 1. A view of the room with the last (No. 7) variant of acoustic treatment

pomieszczenia w obszarze do ok. 770 m³. Wynika z tego, że w przypadku oceniania pomieszczeń o większej kubaturze konieczne jest uściślenie dotychczas stosowanej metody. Również w przypadku, gdy stanowiska pracy są w grupach oddalonych od siebie, nie ma uzasadnienia uwzględnianie przy ocenie właściwości akustycznych pomieszczenia (pod względem zapewnienia w nich odpowiednich warunków pracy) obszaru między tymi grupami. Wówczas bardziej miarodajne, zdaniem autora, jest bezpośrednie ocenianie zrozumiałości mowy przenikającego dźwięku mowy między tymi grupami stanowisk pracy.

Uściślenie dotychczas stosowanej metody oceny właściwości akustycznych pomieszczenia

zgodnie z PN-EN ISO 3382-3:2012 [19]

dla pomieszczeń o dużej kubaturze

Sposób określania wielkości stosowanych w ocenie właściwości akustycznych pomieszczenia zgodnie z PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] narzuca konieczność uwzględnienia w nim 4–10 punktów pomiarowych/obliczeniowych (miejsc/stanowisk pracy), tj. łącznie ze wzorcowym źródłem mowy – 5–11 punktów. Przy założeniu średniej odległości stanowisk pracy ok. 1,2–2 m oraz maksymalnej odległości punktów od wzorcowego źródła mowy (16 m [19]) określa to obszar pomieszczenia o dłuższym wymiarze liniowym – 6–22 m. Standardowa wysokość

tego typu pomieszczeń wynosi ok. 3,5 m, a szerokość umożliwiająca ulokowanie 2–5 stanowisk pracy w jednym rzędzie to 5–10 m. Warunki te implikują maksymalną kubaturę pomieszczenia, z której określa się jego właściwości akustyczne metodą według PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] na ok 770 m³. Określenie właściwości akustycznych pomieszczeń o większej kubaturze wymaga rozszerzenia metody. W artykule proponuje się podział pomieszczenia o większej kubaturze na mniejsze części/obszary <770 m³ (tzw. strefy) reprezentatywne dla właściwości akustycznych pomieszczenia. W obszarach tych właściwości akustyczne określa się metodą podaną w PN-EN ISO 3382-3:2012 [19]. Ocena właściwości akustycznych całego pomieszczenia jest wynikiem ocen składowych (mniejszych obszarów, stref), przy czym wypadkowa ocena wynika z najgorszej oceny składowej. Oznacza to, że do uzyskania oceny dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia konieczne jest uzyskanie dobrych właściwości akustycznych we wszystkich strefach.

Metoda oceny właściwości akustycznych pomieszczenia lub fragmentu biurowego pomieszczenia open space

w przypadku, gdy stanowiska pracy w pomieszczeniu są pogrupowane, a grupy są oddalone od siebie

Specyfiką dużych pomieszczeń pracy jest grupowanie stanowisk pracy w wielu obszarach. Między grupami zachowywany jest pewien dystans umożliwiający zamiast

Tabela 1. Kryterium I oceny w skali trzystopniowej właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń open space
Table 1. Criterion 1 for assessing the acoustic properties of open-plan office rooms on a 3-level scale

Wielkość kryterialna Criteria parameter	Właściwości akustyczne pomieszczenia Acoustic properties of the room		
	złe (niewystarczające) bad (insufficient)	słabe (dostateczne) poor (fair)	dobrze good
A_r (500, 1000, 2000 Hz)	$A_r < 1,1 \times S_p^*$	$1,1 S_p \leq A_r < 1,5 \times S_p$	$1,5 \times S_p \leq A_r$
T_f (500, 1000, 2000 Hz)	$0,51 \text{ s} < T_f$	$0,38 \text{ s} < T_f \leq 0,51 \text{ s}$	$T_f \leq 0,38 \text{ s}$
$L_{p,A,S,4 \text{ m}}$	$50 \text{ dB} < L_{p,A,S,4 \text{ m}}$	$48 \text{ dB} < L_{p,A,S,4 \text{ m}} \leq 50 \text{ dB}$	$L_{p,A,S,4 \text{ m}} \leq 48 \text{ dB}^{**}$
$D_{2,S}$	$D_{2,S} < 5 \text{ dB}$	$5 \text{ dB} \leq D_{2,S} < 7 \text{ dB}$	$7 \text{ dB} \leq D_{2,S}^{**}$
r_D	$10 \text{ m} < r_D$	$5 \text{ m} < r_D \leq 10 \text{ m}$	$r_D \leq 5 \text{ m}^{**}$

* Kryterium według PN-B-02151-4:2015 [23] / Criterion according to PN-B-02151-4:2015 4:2015 [23].

** Kryterium według PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] / Criterion according to EN-ISO 3382-3:2012 [19].

Kolorami oznaczono właściwości akustyczne: czerwony – złe, żółty – słabe, zielony – dobre / Acoustic properties are marked with colors: red – bad, yellow – fair, green – good.
 A_r – chłonność akustyczna pomieszczenia w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych $f = 500, 1000$ i 2000 Hz [m^2] / sound absorption of the room in octave frequency bands with center frequencies $f = 500, 1000$ and 2000 Hz [m^2], $D_{2,S}$ – spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości [dB] / spatial decay rate of speech [dB], $L_{p,A,S,4 \text{ m}}$ – poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m [dB] / A-weighted sound pressure level of speech, at a distance of 4 m [dB], r_D – promień rozproszenia [m] / / distraction distance [m], S_p – pole powierzchni rzutu pomieszczenia / floor area of the room [m^2], T_f – czas pogłosu w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych $f = 500, 1000$ i 2000 Hz [s] (obliczony w artykule wg wzoru Sabine'a dla rozpatrywanego pomieszczenia) / reverberation time in octave frequency bands with center frequencies $f = 500, 1000$ and 2000 Hz [s] (calculated in the article according to Sabine's formula for the room under consideration).

stosowania metody oceny właściwości akustycznej według PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] (część druga kryterium I) użycie takiej, której kryteria oceny bezpośrednio odnoszą się do przenikania dźwięków mowy między tymi grupami stanowisk pracy. W istocie chodzi o ocenę właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space wraz z już zastosowaną aranżacją stanowisk pracy. W takim przypadku możliwe jest pominięcie w ocenie przestrzeni między grupami stanowisk pracy (podejście analogicznie do rozpatrywania hałasu w miejscach, gdzie nie przebywają ludzie). Istotną staje się zatem ocena separacji akustycznej, którą określa się wielkościami: wskaźnikiem transmisji mowy STI_{odb} i poziomem dźwięku A mowy $L_{p,A,S,\text{odb}}$ w obszarze odbiorczym (grupa stanowisk pracy nr 2) od wzorcowego źródła mowy w obszarze nadawczym (grupa stanowisk pracy nr 1). Dalej w artykule to nowe kryterium oceny właściwości akustycznych pomieszczenia (właściwie fragmentu pomieszczenia) określa się jako kryterium II. W kryterium II (analogicznie do kryterium I) wprowadzono ocenę właściwości akustycznych pomieszczenia lub fragmentu pomieszczenia w skali trzystopniowej (złe, słabe, dobre właściwości akustyczne). Wartości graniczne wskazano na podstawie wartości wskaźnika transmisji mowy STI równe 0,3 i 0,45. Ocena ta jest „odwrotna” do oceny zrozumiałości mowy określanej wskaźnikiem transmisji mowy STI według PN-EN 60268-16:2011 [25] i PN-EN ISO 9921:2005 [26], gdzie zrozumiałość mowy:

- zła dla $STI < 0,3$,
- słaba dla $0,3 \leq STI < 0,45$,

- dostateczna dla $0,45 \leq STI < 0,6$,
- dobra dla $0,6 \leq STI < 0,75$ itd.

Kryterium oceny nr II podano w tabeli 2.

Metoda badań

Celem badań było uwzględnienie takich elementów adaptacji akustycznej (dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, materiału dźwiękochłonnego na ścianach oraz ekranów akustycznych) w trzynawowym biurowym pomieszczeniu open space o dużej kubaturze, aby uzyskać jego dobre właściwości akustyczne (podrozdział „Kryteria oceny akustycznej” niniejszego artykułu). W innym badaniu [27] autor w części rozpatrywanego pomieszczenia wykonał badania pilotażowe uwzględnienia wpływu dźwiękochłonnej wykładziny dywanowej nieujętej w bieżącym artykule. Odpowiednie właściwości akustycznego środowiska pracy uzyskuje się dzięki dobrym właściwości akustycznych pomieszczenia przy zadanym poziomie dźwięku A tła akustycznego.

Metoda badań polega na iteracyjnym obliczeniowym uwzględnianiu w rozpatrywanym pomieszczeniu (rycina 1) coraz większej liczby elementów adaptacji akustycznej (tabela 3), aż do uzyskania jego dobrych właściwości akustycznych (podrozdział „Kryteria oceny akustycznej”). Każda iteracja określa jeden wariant adaptacji akustycznej. Przebieg procedury:

- ocenia się właściwości akustyczne pomieszczenia kryteriami określonymi w podrozdziale „Kryteria oceny akustycznej” (dla tzw. wariantu 0 adaptacji akustycznej, tj. bez uwzględnienia adaptacji

Tabela 2. Kryterium II oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń open space w obszarze odbiorczym (skala trzypięciowa)
Table 2. Criterion II for assessing the acoustic properties of open-plan office rooms in the receiving area (a 3-level scale)

Parametr Parameter	Separacja akustyczna Acoustic separation		
	zła bad	słaba poor	dobra good
Wskaźnik transmisji mowy STI w obszarze odbiorczym STI_{odb} / Speech transmission index in the receiving area, STI_{odb}	$0,45 < STI_{odb}$	$0,3 < STI_{odb} \leq 0,45$	$STI_{odb} \leq 0,3$
Poziom dźwięku A mowy w obszarze odbiorczym $L_{p,A,S,odb}$ / A-weighted sound pressure level of speech in the receiving area, $L_{p,A,S,odb}$	$40 \text{ dB} < L_{p,A,S,odb}$	$35 \text{ dB} < L_{p,A,S,odb} \leq 40 \text{ dB}$	$L_{p,A,S,odb} \leq 35 \text{ dB}$

Oznaczenia kolorystyczne jak w tabeli 1 / Color markings as in table 1.

akustycznej). W wypadku nieuzyskania oceny dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia przechodzi się do punktu następnego. Jeżeli ocena dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia zostanie uzyskana, nie jest konieczne uwzględnienie adaptacji akustycznej pomieszczenia;

- uwzględnia się w pomieszczeniu nowy element lub elementy adaptacji akustycznej – ten wariant adaptacji akustycznej określa się numerem kolejnym;
- dla tego wariantu adaptacji akustycznej ocenia się właściwości akustyczne pomieszczenia kryteriami określonymi w podrozdziale „Kryteria oceny akustycznej”. W przypadku uzyskania oceny dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia nie jest konieczne uwzględnienie dodatkowych elementów adaptacji akustycznej. W przeciwnym wypadku przechodzi się do punktu poprzedniego.

W rozpatrywanym pomieszczeniu uwzględniono

7 wariantów adaptacji akustycznej:

- 0 – biurowe pomieszczenie open space bez elementów adaptacji akustycznej,
- 1 – zastosowanie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego,
- 2 – jak w wariantcie 1 oraz zastosowanie ekranów akustycznych stanowiskowych (tj. na biurkach pracowników, rycina 1),
- 3 – jak w wariantcie 2 oraz zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia (rycina 1),
- 4 – jak w wariantcie 3 oraz zastosowanie ekranów akustycznych rozdzielających nawy (rycina 1),
- 5 – jak w wariantcie 4 oraz zastosowanie ekranów akustycznych rozdzielających grupy stanowisk pracy (rycina 1),
- 6 – jak w wariantcie 5 oraz zastosowanie ekranów akustycznych stojących w przejściach (rycina 1),
- 7 – jak w wariantcie 6 oraz zastosowanie ekranu akustycznego podwieszanego w przejściu (rycina 1).

Elementy adaptacji akustycznej opisano szerzej w części „Omówienie”.

Ponieważ na wartości wielkości stosowanych w ocenie właściwości akustycznych pomieszczenia w kryteriach I i II (promień rozproszenia i wskaźnik transmisji mowy STI) wpływa tło akustyczne (określane bez obecności ludzi), przyjęto poziom dźwięku A tła równy 35 dB (wartość zbliżona do wartości dopuszczalnej określonej normą PN-B-02151-2:2018 [4] po uwzględnieniu właściwości pochłaniających pomieszczenia) o widmie niskoczęstotliwościowym (tabela 4).

Badanie obliczeniowe przeprowadzono metodami numerycznymi na podstawie symulacji pola akustycznego w pomieszczeniach (zastosowano program komputerowy ODEON wersja 16 [29]; przydatność tego narzędzia do badań wykazano wcześniej [6,8,15,16]).

Ze względu na dużą kubaturę pomieszczenia rozpatrywano jego właściwości akustyczne w strefach A, B, C, D, E i F (rycina 2), charakterystycznych i reprezentatywnych dla właściwości akustycznych całego pomieszczenia.

Aranżacja stanowisk pracy w strefach A, B, C i D jest typowa i dlatego ocenę właściwości akustycznych w tych strefach przeprowadzono według kryterium I.

Odmienne oceniano właściwości akustyczne pomieszczenia w obszarach, w których zachodziła propagacja dźwięku przez ciągi piesze (propagacja dźwięku z nawy 1 do nawy 2 i 3). Przypadki te rozpatrywano jako ocenę właściwości akustycznych w strefach pomieszczenia E i F. Ocenę właściwości akustycznych w tych strefach przeprowadzono według kryterium II (podrozdział „Kryteria oceny akustycznej” oraz kryterium w tabeli 2).

WYNIKI

Na rycinie 3 podano wyniki obliczeń czasu pogłosu pomieszczenia w strefie C dla wariantów adaptacji akustycznej 0–7 (tabela 3).

Tabela 3. Warianty adaptacji akustycznej rozpatrywanego biurowego pomieszczenia open space
Table 3. Variants of acoustic treatment of the open-plan office room under consideration

Wariant adaptacji akustycznej Variant of acoustic treatment	Element adaptacji akustycznej Element of acoustic adaptation						
	ekrany akustyczne stanowiskowe acoustic screens at workstations ($h_1 = 0,75$ m, $h_2 = 1,7$ m, $\alpha_w = 0,9$)	material dźwiękochłonny na wewnętrznych ścianach pomieszczenia sound-absorbing material on the interior walls of the room ($\alpha_w = 0,9$)	ekrany akustyczne rozdzielające nawy separating the naves ($h_1 = 0$ m, $h_2 = 2,5$ m, $\alpha_w = 0,9$)	ekrany akustyczne rozdzielające grupy stanowisk pracy acoustic screens separating groups of workstations ($h_1 = 0$ m, $h_2 = 1,7/2$ m, $\alpha_w = 0,9$)	ekrany akustyczne stojące w przejściach acoustic screens standing in the passage ($h_1 = 0$ m, $h_2 = 1,5$ m, $\alpha_w = 0,9$)	ekran akustyczny podwieszony suspended acoustic screen ($h_1 = 2,5$ m, $h_2 = 3$ m, $\alpha_w = 0,9$)	
0	-	-	-	-	-	-	
1	x	-	-	-	-	-	
2	x	-	-	-	-	-	
3	x	x	-	-	-	-	
4	x	x	x	-	-	-	
5	x	x	x	x	-	-	
6	x	x	x	x	x	-	
7	x	x	x	x	x	x	

α_w – ważony wskaźnik pochłaniania dźwięku / weighted sound absorption coefficient, h_1 – wysokość od podłogi (dolnej krawędzi) [m], h_2 – wysokość od podłogi (górnej krawędzi) [m] / height from the floor (upper edge) [m], x – zastosowanie wymienionego elementu / indicates the use of a given element.

Wyniki obliczeń poziomu dźwięku A mowy w odległości 4 m, spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości oraz promienia rozproszenia do określania właściwości akustycznych pomieszczenia w strefach A–D (kryterium I) dla wariantów adaptacji akustycznej 0–7 podano w tabeli 5.

Wyniki obliczeń poziomu dźwięku A mowy $L_{p,A,S,odb}$ i wskaźnika transmisji mowy STI_{odb} do miarodajnej oceny właściwości akustycznych pomieszczenia w strefach E i F (kryterium II) dla wariantów adaptacji akustycznej 3–7 podano w tabeli 6 (pominięto wyniki obliczeń dla wariantów 0–2 ze względu na fakt, że poszukuje się wariantu adaptacji akustycznej spełniającego wymagania akustyczne we wszystkich strefach, a dla wariantów 0–2 w żadnej ze stref A–D właściwości nie były dobre).

Dla ilustracji wyników obliczeń podano wybrane rozkłady wartości wskaźnika transmisji mowy STI w strefach pomieszczenia, w których uzyskanie dobrych właściwości akustycznych wymagało największej adaptacji akustycznej:

- rycina 4 – w strefie E, dla wariantów adaptacji akustycznej 3 i 4 (różniące się zastosowaniem ekranów akustycznych między nawami),
- rycina 5 – w strefie F, dla wariantów adaptacji akustycznej 5–7 (różniące się zastosowaniem ekranów akustycznych stojących w przejściu oraz ekranu podwieszonego).

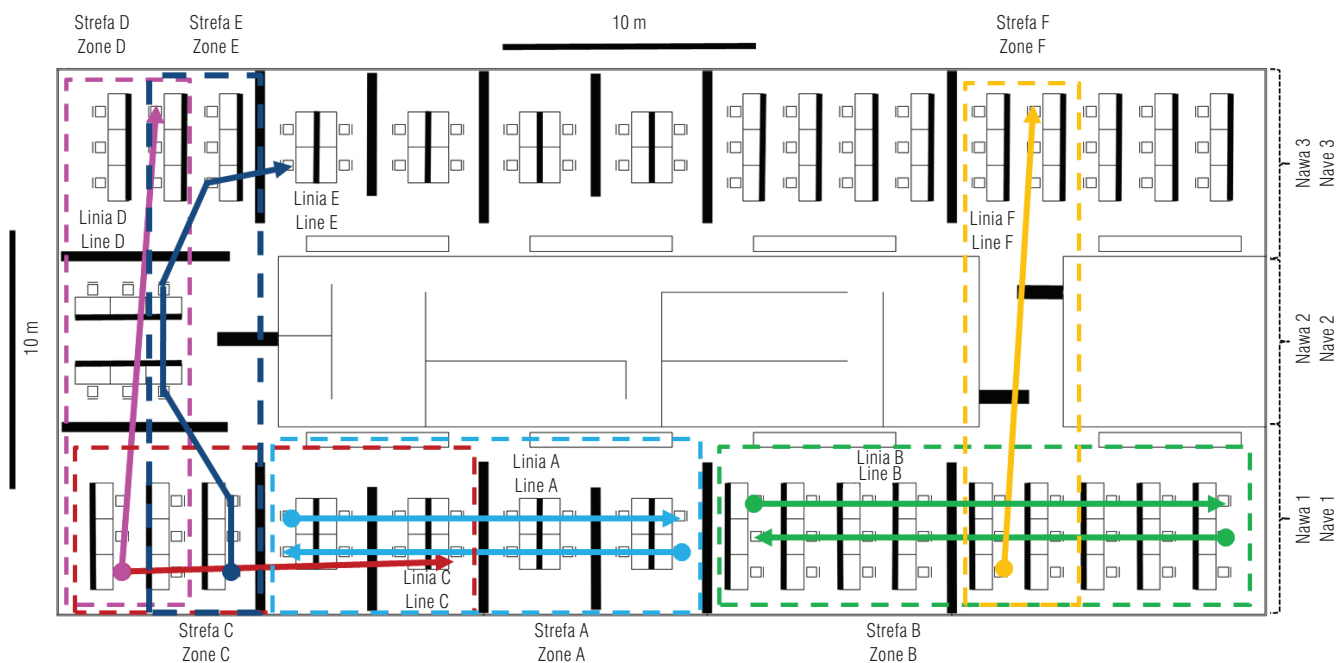
OMÓWIENIE

Celem badań było określenie adaptacji akustycznej w biurowym pomieszczeniu open space o kubaturze 2750 m³, która umożliwiłaby uzyskanie dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia według PN-B-02151-4:2015 [23] i PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] (kryterium I) oraz kryterium podanego w artykule (kryterium II, podrozdział „Metoda oceny właściwości akustycznych pomieszczenia lub fragmentu biurowego pomieszczenia open space dla przypadku, gdy stanowiska pracy w pomieszczeniu są pogrupowane, a grupy są oddalone od siebie”) odnoszącego się do zapewnienia separacji akustycznej między grupami stanowisk pracy. Właściwości akustyczne pomieszczenia oceniono w reprezentatywnych dla właściwości akustycznych obszarach/strefach pomieszczenia A–F. W strefach A, B, C i D (typowe rozmieszczenie stanowisk pracy w biurowych pomieszczeniach open space) w ocenie zastosowano kryterium I (tabela 1), a wyniki podano na rycinie 3 i tabeli 5. W strefach E i F,

Tabela 4. Przyjęte widmo tła akustycznego (poziom ciśnienia akustycznego w pasmach oktaowych) dla poziomu dźwięku A 35 dB (widmo tła według ODEON [27])

Table 4. Spectrum of the background noise included in the study (the sound pressure level in octave bands) for the A-weighted sound pressure level of 35 dB (spectrum according to ODEON [27])

...	...
Częstotliwość środkowa oktaowego pasma częstotliwości / The center frequency of the octave frequency band [Hz]	63 125 250 500 1000 2000 4000 8000
Poziom dźwięku A tła akustycznego / The A-weighted sound pressure level of background noise [dB]	53,4 43,4 36,4 30,4 26,4 23,4 21,4 20,4



Linie obliczeniowe, na których określa się wskaźnik transmisji mowy STI i poziom dźwięku A mowy, oznaczono liniami: rozpoczynającymi się w punkcie wzorcowego źródła mowy oraz zakończonymi grotami strzałki w ostatnim punkcie obliczeniowym / The calculation lines on which the speech transmission index and the A-weighted sound pressure level of speech are determined, marked with lines: starting at the point of the reference speech source and ending with an arrowhead – the last calculation point.

Rycina 2. Rzut pomieszczenia z zaznaczonymi strefami, w których określa się propagację dźwięku od wzorcowego źródła dźwięku
Figure 2. A view of the room with marked zones where the propagation of sound from the reference speech source is determined

w których stanowiska pracy zgrupowane były odpowiednio w 3 i 2 grupach, oddalonych od siebie, w ocenie zastosowano nowe kryterium II (tabela 2), a wyniki podano w tabeli 6.

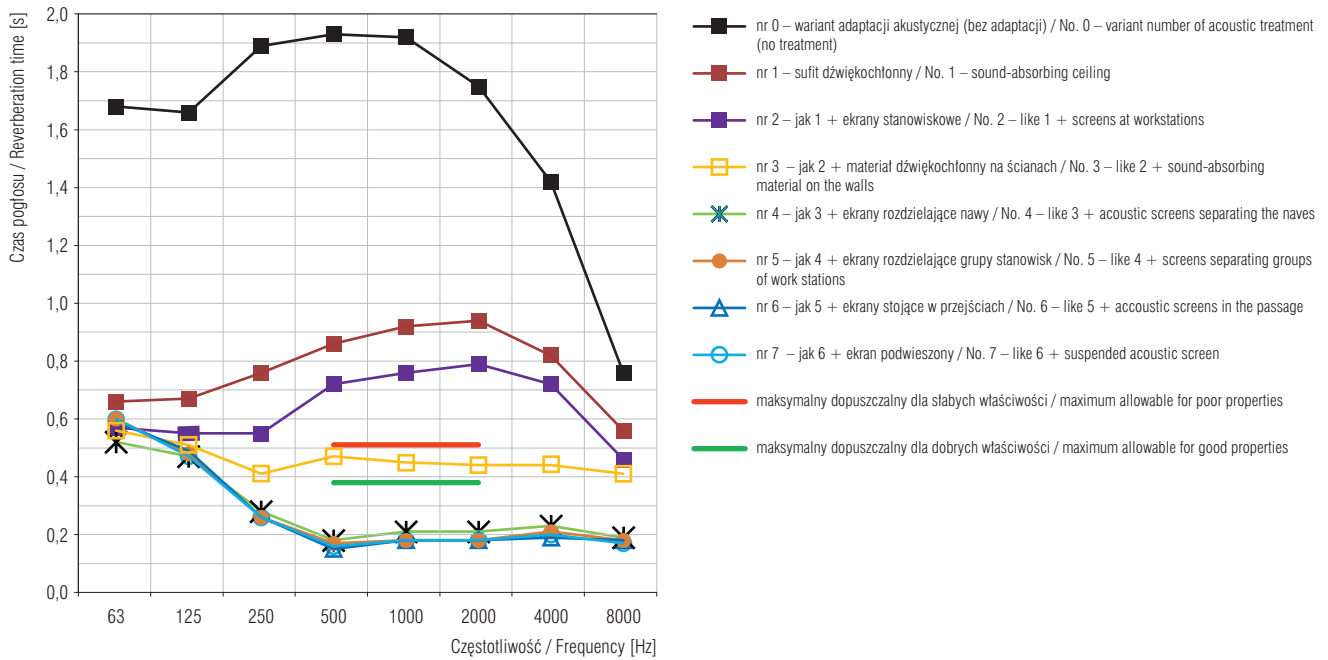
W obu tabelach kolor tła pól, na których znajdują się wartości wielkości kryterialnych, musi być zielony (dobre właściwości akustyczne).

Wariant adaptacji akustycznej 0 (przed adaptacją akustyczną)

Pomieszczenie bez adaptacji akustycznej ma za małą chłonność akustyczną, co wynika z obliczonych za dużych wartości czasu pogłosu pomieszczenia (średni z oktaowych pasm częstotliwości z zakresu 500–2000 Hz czas pogłosu $T_{500-2000\text{ Hz}}$ wynosi 1,87 s, natomiast maksymalna dopuszczalna wartość czasu pogłosu

dla dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia $T_{500-2000\text{ Hz,max-dobre}} = 0,38\text{ s}$, a nawet maksymalna dopuszczalna wartość czasu pogłosu dla słabych właściwości akustycznych pomieszczenia $T_{500-2000\text{ Hz,max-słabe}} = 0,51\text{ s}$; rycina 3). Oceniając właściwości akustyczne pomieszczenia na podstawie czasu pogłosu, stwierdza się jego złe właściwości akustyczne. W strefach A i C złe właściwości akustyczne pomieszczenia wynikają także z wartości (tabela 5): spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości i poziomu dźwięku A mowy w odległości 4 m (promień rozproszenia ma wartość dla słabych właściwości akustycznych). W strefach B i D złe właściwości akustyczne wynikają z wartości wszystkich wielkości kryterialnych.

Wyniki badań (pomieszczenia bez adaptacji akustycznej) wskazują, że we wszystkich strefach (A–D)



Rycina 3. Czas pogłosu w strefie C pomieszczenia dla wszystkich wariantów adaptacji akustycznej
 Figure 3. Reverberation time in zone C of the room for all variants of acoustic treatment

Tabela 5. Wyniki obliczeń wielkości stosowanych do oceny właściwości akustycznych pomieszczenia biurowego open space według PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] (kryterium I) w strefach A, B, C i D
 Table 5. The results of calculations of parameters used to assess the acoustic properties of an open-plan office room according to PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] (criterion I) in zones A, B, C and D

Wariant adaptacji akustycznej Variant of acoustic treatment	Strefa Zone											
	A			B			C			D		
	$D_{2,5}$ [dB]	$L_{pA,S,4m}$ [dB]	r_D [m]	$D_{2,5}$ [dB]	$L_{pA,S,4m}$ [dB]	r_D [m]	$D_{2,5}$ [dB]	$L_{pA,S,4m}$ [dB]	r_D [m]	$D_{2,5}$ [dB]	$L_{pA,S,4m}$ [dB]	r_D [m]
0	1,5	55,3	8,6	1,8	56,0	11,4	2,0	55,1	8,8	1,1	55,4	13,5
1	3,4	49,3	12,7	3,7	50,1	15,4	4,1	49,6	12,7	2,7	49,7	20,3
2	5,1	45,1	7,5	6,9	42,3	5,5	8,4	43,0	5,9	4,8	47,2	12,8
3	7,4	42,8	6,7	7,9	39,7	4,6	9,3	42,7	5,8	5,0	46,9	12,4
4	7,5	42,7	6,7	8,0	39,6	4,5	8,9	42,6	6,0	11,4	39,9	4,8
5	10,0	39,1	4,5	9,7	39,3	4,2	12,3	40,0	4,6	11,1	40,2	5,0
6	10,1	39,1	4,5	9,6	39,5	4,4	12,2	40,2	4,6	11,3	40,2	5,0
7	9,9	39,1	4,5	9,6	39,4	4,4	12,2	40,2	4,6	11,5	39,9	4,8

$D_{2,5}$ – spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości [dB] / spatial decay rate of speech [dB], $L_{pA,S,4m}$ – poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m [dB] / A-weighted sound pressure level of speech, at a distance of 4 m [dB], r_D – promień rozproszenia [m] / distraction distance [m].

Kolorami oznaczono właściwości akustyczne: zielony – dobre, żółty – słabe, czerwony – złe (kryterium I, tabela 1) / Acoustic properties are marked with colors: green – good, yellow – fair, red – bad (criterion I, table 1).

są złe właściwości akustyczne. Aby je poprawić, konieczne jest zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia. Chłonność akustyczną pomieszczenia najbardziej zwiększa zastosowanie sufitu dźwiękochłonnego.

Wariant adaptacji akustycznej 1 (zastosowanie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego)

Po uwzględnieniu w rozpatrywanym pomieszczeniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego nadal

Tabela 6. Poziom dźwięku A mowy $L_{p,A,S,odb}$ i wskaźnik transmisji mowy STI_{odb} na stanowiskach pracy w nawach 2 i 3 stref E i F (wzorcowe źródło mowy w nawie 1), dla wariantów adaptacji akustycznej 3–7 (ocena według kryterium II, tabela 2)

Table 6. The A-weighted sound pressure level of speech $L_{p,A,S,odb}$ and speech transmission index STI_{odb} at workstations in naves 2 and 3 of zones E and F (the reference speech source in nave 1), for treatment variants 3–7 (the assessment according to criterion II, table 2)

Wariant adaptacji akustycznej Variant of acoustic treatment	Strefa E Zone E				Strefa F Zone F	
	nawa 2 nave 2		nawa 3 nave 3		nawa 3 nave 3	
	$L_{p,A,S,odb}$ [dB] (M (min.–max))	STI_{odb} [dB] (M (min.–max))	$L_{p,A,S,odb}$ [dB] (M (min.–max))	STI_{odb} [dB] (M (min.–max))	$L_{p,A,S,odb}$ [dB] (M (min.–max))	STI_{odb} [dB] (M (min.–max))
3	37,8 (34,8–40,8)	0,44 (0,33–0,54)	41,1 (40,4–41,7)	0,52 (0,49–0,54)	38,9 (31,6–41,2)	0,47 (0,25–0,53)
4	27,7 (26,0–29,4)	0,17 (0,13–0,21)	35,5 (31,1–39,9)	0,39 (0,28–0,54)	39,1 (32,2–41,3)	0,47 (0,26–0,53)
5	27,4 (25,9–28,8)	0,16 (0,12–0,19)	34,6 (29,3–39,8)	0,35 (0,20–0,49)	39,0 (32,2–41,4)	0,48 (0,26–0,54)
6	27,7 (26,6–28,8)	0,18 (0,15–0,20)	30,0 (26,2–33,7)	0,21 (0,13–0,29)	33,5 (29,7–35,1)	0,31 (0,19–0,35)
7	27,3 (25,8–28,8)	0,16 (0,12–0,20)	30,3 (26,4–34,1)	0,22 (0,14–0,30)	29,3 (25,4–32,3)	0,19 (0,09–0,27)

$L_{p,A,S,odb}$ – poziom dźwięku A mowy w obszarze odbiorczym / A-weighted sound pressure level of speech in the receiving area, STI_{odb} – wskaźnik transmisji mowy STI w obszarze odbiorczym / speech transmission index in the receiving area.

Kolorami oznaczono właściwości akustyczne: zielony – dobre, żółty – słabe, czerwony – złe (kryterium II, tabela 2) / Acoustic properties are marked with colors: green – good, yellow – poor, red – bad (criterion I, table 1).

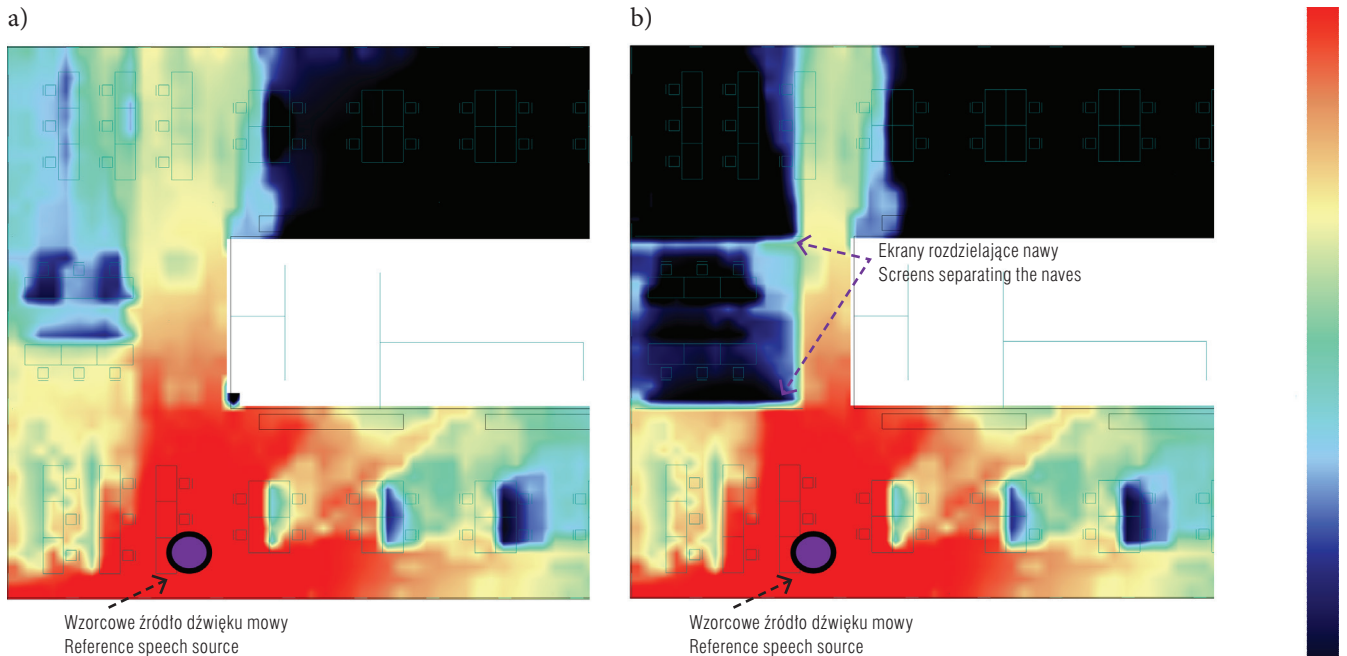
ma ono za małą chłonność akustyczną (czas pogłosu $T_{500-2000\text{ Hz}} = 0,91\text{ s}$, gdy $T_{500-2000\text{ Hz,max-dobre}} = 0,38\text{ s}$, $T_{500-2000\text{ Hz,max-słabe}} = 0,51\text{ s}$). Oceniając właściwości akustyczne pomieszczenia na podstawie czasu pogłosu, stwierdza się złe właściwości akustyczne pomieszczenia. W strefach A, C i D złe właściwości akustyczne pomieszczenia wynikają także z wartości: spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości i promienia rozproszenia (poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m ma wartości dla słabych właściwości akustycznych). W strefie B złe właściwości akustyczne pomieszczenia wynikają z wartości wszystkich wielkości kryterialnych.

Wyniki badań (po zastosowaniu w pomieszczeniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego) wskazują, że w strefach A–D nadal panują złe właściwości akustyczne pomieszczenia. Aby je poprawić, konieczne jest dalsze zwiększanie chłonności akustycznej pomieszczenia. Można to uzyskać, uwzględniając dodatkowo materiały dźwiękochłonne na ścianach/podłodze lub zastosowanie ekranów akustycznych o dużej chłonności akustycznej. W następnym wariantcie adaptacji akustycznej pomieszczenia zdecydowano się na zastosowanie dodatkowych ekranów akustycznych, co wynika z konieczności uzyskania spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości $D_{2,s} > 7\text{ dB}$ (6 dB spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości od źródła dźwięku występuje w przestrzeni otwartej i dlatego bez ekranów akustycznych nie jest możliwe uzyskanie wartości tej wielkości $> 6\text{ dB}$).

Wariant adaptacji akustycznej 2 (dodatkowe zastosowanie ekranów akustycznych stanowiskowych)

Po dodatkowym w stosunku do adaptacji akustycznej 1 uwzględnieniu ekranów akustycznych stanowiskowych (tj. na biurkach pracowników), pomieszczenie nadal ma za małą chłonność akustyczną (czasu pogłosu pomieszczenia $T_{500-2000\text{ Hz}} = 0,76\text{ s}$, gdy $T_{500-2000\text{ Hz,max-dobre}} = 0,38\text{ s}$, $T_{500-2000\text{ Hz,max-słabe}} = 0,51\text{ s}$). Oceniając właściwości akustyczne pomieszczenia na podstawie czasu pogłosu, stwierdza się złe właściwości akustyczne pomieszczenia. W strefie D złe właściwości akustyczne wynikają także z wartości spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości i promienia rozproszenia. W strefach A i B (nie biorąc pod uwagę czasu pogłosu) słabe właściwości akustyczne wynikają ze spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości i promienia rozproszenia. W strefie C (nie biorąc pod uwagę czasu pogłosu) słabe właściwości akustyczne wynikają z wartości promienia rozproszenia.

Wyniki badań (po zastosowaniu w pomieszczeniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego i ekranów akustycznych stanowiskowych) wskazują, że złe właściwości akustyczne pomieszczenia (wynikające przede wszystkim z za małej chłonności akustycznej pomieszczenia) utrzymują się. Dla ich poprawy konieczne jest dalsze zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia. Można to uzyskać przez dodatkowe zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych na ścianach lub podłodze. Wybrano zastosowanie dźwiękochłonnych



Różnica wynika z uwzględnienia ekranów akustycznych między nawami; granica: dobre/słabe – STI = 0,3, słabe/złe – STI = 0,45 / The difference results from taking into account the acoustic screen between the nave; border: good/poor – STI = 0.3, poor/bad – STI = 0.45.

Rycina 4. Rozkład wartości wskaźnika transmisji mowy STI w części pomieszczenia obejmującego strefę E, dla wariantu adaptacji akustycznej: a) nr 3, b) nr 4

Figure 4. Spatial speech transmission index distribution in the part of the room covering zone E for the variant of acoustic treatment: a) No. 3, b) No. 4

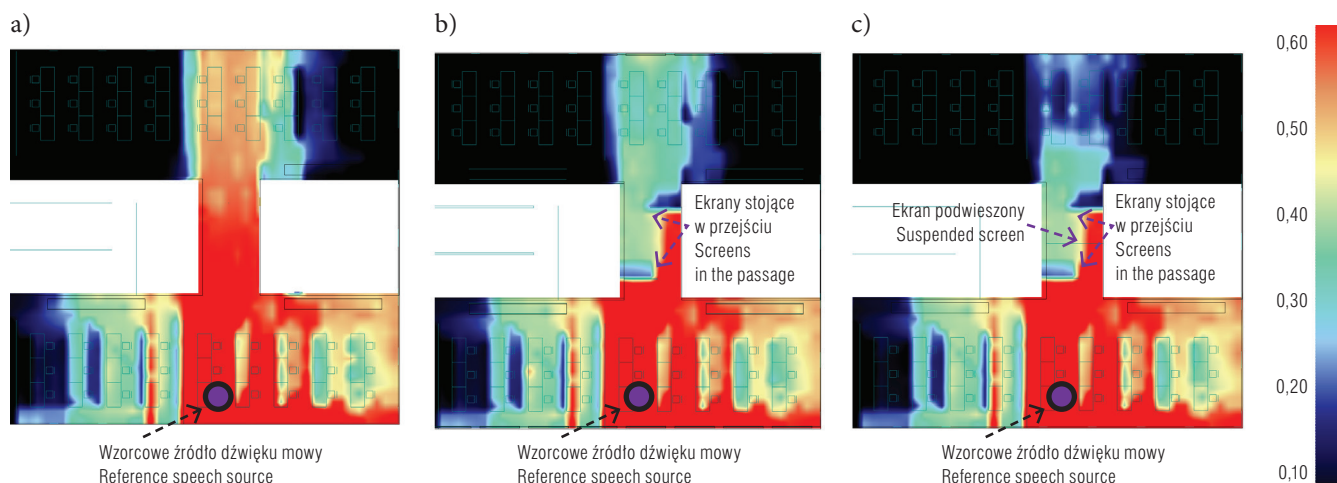
materiałów na ścianach (większa efektywność – można zastosować materiały o znacznie większym współczynniku pochłaniania dźwięku).

Wariant adaptacji akustycznej 3 (dodatkowe zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia)

Po dodatkowym wobec adaptacji 2 uwzględnieniu materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia, czas pogłosu pomieszczenia $T_{500-2000\text{ Hz}} = 0,45\text{ s}$ ($T_{500-2000\text{ Hz,max-dobre}} = 0,38\text{ s}$, $T_{500-2000\text{ Hz,max-słabe}} = 0,51\text{ s}$), tzn. są słabe właściwości akustyczne pomieszczenia ze względu na czas pogłosu. W strefie D utrzymują się złe właściwości akustyczne, które wynikają z wartości promienia rozproszenia. W strefach A i C słabe właściwości akustyczne pomieszczenia wynikają (poza czasem pogłosu) z promienia rozproszenia. W strefie B (nie biorąc pod uwagę czasu pogłosu) dobre właściwości akustyczne wynikają z wartości wszystkich pozostałych wielkości kryterialnych: spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości, poziomu dźwięku A mowy w odległości 4 m i promienia rozproszenia. Wyniki badań wskazują, że w strefie D są złe właściwości akustyczne pomieszczenia, a w strefach A,

B i C – słabe. Najlepsze właściwości akustyczne ma strefa B, co jest m.in. wynikiem umieszczenia stanowisk pracy w rzędach. W strefie D propagacja dźwięku następuje wzdłuż ekranów stanowiskowych, dlatego właściwości akustyczne pozostają najgorsze.

Od wariantu 3 adaptacji akustycznej podano właściwości akustyczne pomieszczenia w strefach E i F (dla poprzednich wariantów adaptacji akustycznej były złe właściwości akustyczne pomieszczenia). Ocenę przenikania dźwięku mowy z nawy 1 (w której umieszczono wzorcowe źródło mowy) do naw 2 i 3 (tzw. odbiorczych) według kryterium II podano w tabeli 6. Dla strefy E średnia (w obszarze odbiorczym) wartość poziomu dźwięku A mowy wynosi: w nawie 2 – 37,8 dB, a nawie 3 – 41,1 dB (maksymalna dopuszczalna dla dobrych właściwości akustycznych $L_{p,A,S,max-dobre} = 35\text{ dB}$, maksymalna dopuszczalna dla słabych właściwości akustycznych $L_{p,A,S,max-słabe} = 40\text{ dB}$, tabela 2), natomiast wartość średniego wskaźnika transmisji mowy STI wynosi w nawie 2 – 0,44, a nawie 3 – 0,52 (maksymalna dopuszczalna dla dobrych właściwości akustycznych $STI_{max-dobre} = 0,3$, maksymalna dopuszczalna dla słabych właściwości akustycznych $STI_{max-słabe} = 0,45$). Średnie właściwości akustyczne pomieszczenia w strefie E w nawie 2 są słabe, a w nawie 3 – złe. Świadczy to o za małej separacji



Różnice wynikają z rycin 5b i 5a – uwzględnienia ekranów stojących w przejściu, rycin 5c i 5b – uwzględnienia ekranu podwieszono; granica: dobre/słabe – STI = 0,3, słabe/złe – STI = 0,45 / The difference results from taking into account: Figures 5b and 5a – consideration of screens in the passage, Figure 5c and 5b – consideration of the suspended screen; border: good/poor – STI = 0.3, poor/bad – STI = 0.45.

Rycina 5. Rozkład wartości wskaźnika transmisji mowy STI w części pomieszczenia obejmującego strefę F, dla wariantu adaptacji akustycznej: a) nr 5, b) nr 6, c) nr 7

Figure 5. Spatial speech transmission index distribution in the part of the room covering zone F for the variant of acoustic treatment: a) No. 5, b) No. 6, c) No. 7

akustycznej między nawami. Dla strefy F wartość średniego poziomu dźwięku A mowy $L_{p,A,S,odb}$ wynosi w nawie 3 – 38,9 dB ($L_{p,A,S,max-dobre} = 35$ dB, $L_{p,A,S,max-słabe} = 40$ dB), natomiast wartość średniego wskaźnika transmisji mowy STI_{odb} w nawie 3 – 0,47 ($STI_{max-dobre} = 0,3$, $STI_{max-słabe} = 0,45$), co określa właściwości akustyczne pomieszczenia w strefie F jako złe.

Wyniki badań (po zastosowaniu w pomieszczeniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, ekranów akustycznych stanowiskowych i materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia) wskazują, że utrzymują się złe właściwości akustyczne pomieszczenia. W celu ich poprawienia nawy należy odseparować akustycznie. Ponieważ w nawie 3 strefy E właściwości akustyczne są gorsze niż w nawie 3 strefy F, w pierwszej kolejności uwzględni się odseparowanie nawy w strefie E (rozwiązanie to będzie miało także istotny wpływ na właściwości akustyczne w strefie D, rycina 4).

Wariant adaptacji akustycznej 4 (dodatkowe zastosowanie ekranów akustycznych rozdzielających nawy)

Po dodatkowym wobec adaptacji akustycznej 3 uwzględnieniu ekranów akustycznych rozdzielających nawy w strefie D i E wartość czasu pogłosu $T_{500-2000\text{ Hz}} = 0,20$ s ($T_{500-2000\text{ Hz,max-dobre}} = 0,38$ s, $T_{500-2000\text{ Hz,max-słabe}} = 0,51$ s), tzn. oceniając właściwości akustyczne pomieszczenia na podstawie czasu pogłosu, stwierdza się dobre właściwości akustyczne pomieszczenia. W strefach A i C utrzymują się słabe właściwości akustyczne, które wynikają

z wartości promienia rozproszenia. Strefa B ma dobre właściwości akustyczne. W strefie D nastąpiła największa poprawa właściwości akustycznych, określając je jako dobre, co jest skutkiem zastosowanych ekranów rozdzielających nawy. Można to zaobserwować na rycinie 4, na której pokazano rozkłady (na wysokości 1,2 m) wartości wskaźnika transmisji mowy STI w części pomieszczenia obejmującej strefy C, D i E (dla źródła dźwięku w strefie D): dla wariantu adaptacji akustycznej 3 (bez ekranów rozdzielających nawy) oraz dla wariantu adaptacji akustycznej 4 (z ekranami rozdzielającymi nawy).

Wyniki badań (po zastosowaniu w pomieszczeniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, ekranów akustycznych stanowiskowych, materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia oraz ekranów akustycznych rozdzielających nawy) wskazują, że w strefach B i D są dobre właściwości akustyczne, a w strefach A i C – słabe.

W strefie F nie zmieniły się właściwości akustyczne (względem wariantu 3 adaptacji akustycznej), gdyż zastosowane ekrany akustyczne rozdzielające nawy są za daleko od tej strefy. Dlatego utrzymują się złe właściwości akustyczne (tabela 6, wskaźnik transmisji mowy STI). Natomiast w strefie E (podobnie jak w strefie D), właściwości akustyczne bardzo się poprawiły (tabela 6). W nawie 2 strefy E są już dobre właściwości akustyczne (poprzednio w wariantie 4 adaptacji akustycznej były słabe), w nawie 3 strefy E są słabe właściwości akustyczne (poprzednio były złe). Można to także zaobserwować na rycinie 4.

Za najważniejsze na tym etapie rozpatrywanych adaptacji akustycznych uznano uzyskanie dobrych właściwości akustycznych w strefach typowej pracy, tj. A, B, C i D (uzyskanie promienia rozproszenia $r_D < 5$ m w strefach A i C), dlatego w następnej adaptacji akustycznej rozpatrzono rozdzielenie ekranami akustycznymi grup stanowisk pracy (ekrany akustyczne w tych strefach, rycina 1).

Wariant adaptacji akustycznej 5 (dodatkowe zastosowanie ekranów akustycznych rozdzielających grupy stanowisk pracy)

Po dodatkowym wobec adaptacji akustycznej 4 uwzględnieniu ekranów akustycznych rozdzielających grupy stanowisk pracy (w strefach A, B i C), w strefach A, B, C i D właściwości akustyczne są dobre.

W strefach E i F właściwości akustyczne nie uległy istotnej zmianie (uwzględnione ekrany akustyczne praktycznie nie wpływają na propagację dźwięku w tych strefach). Oznacza to, że nadal w strefie F są złe właściwości akustyczne, w nawie 3 strefy E – słabe, a w nawie 2 strefy E – dobre. Wynika z tego, że w obu strefach, E i F, występuje za mała separacja akustyczna między nawami 1 i 3 wynikająca z propagacji dźwięków mowy przejściami / ciągami komunikacyjnymi (przy czym w strefie E separacja jest większa niż w strefie F). Dlatego uwzględniono w strefie E 1 ekran akustyczny, a w strefie F – 2 ekrany akustyczne w przejściu (nieograniczające przejścia – pozostawiono szerokość przejścia 1,4 m, a także nieograniczające widoku osoby stojącej – górna krawędź ekranów na wysokości 1,5 m od podłogi).

Wariant adaptacji akustycznej 6 (dodatkowe zastosowanie ekranów akustycznych stojących w przejściach)

Po dodatkowym wobec adaptacji akustycznej 5 uwzględnieniu ekranów akustycznych stojących w przejściach (w strefach E i F), w strefach A, B, C, D i E pomieszczenia są dobre właściwości akustyczne.

W strefie F (tabela 6), mimo iż zwiększyła się separacja akustyczna, są tylko słabe właściwości akustyczne (poprzednio były złe). Efekt ten przedstawiono na rycinie 5a i 5b.

W celu uzyskania także w strefie F dobrych właściwości akustycznych należy zwiększyć separację akustyczną między nawami 1 i 3 w tej strefie. Ponieważ w przejściu już zastosowano 2 ekrany akustyczne, dalsze zwiększanie ich liczby nie jest wskazane ze względów ergonomicznych. Nie będzie również efektywne akustycznie zwiększenie ich wysokości (ich skuteczność ograniczona jest ugięciem się fali dźwiękowej na

krawędziach bocznych ekranów). Nie można również zwiększyć ich szerokości (konieczność pozostawienia 1,4 m szerokości przejścia). Dlatego zastosowano dodatkowy ekran podwieszony (dół ekranu na wysokości 2,5 m od podłogi, a górna krawędź styka się z sufitem podwieszanym, ryciny 1 i 5c).

Wariant adaptacji akustycznej 7 (dodatkowe zastosowanie ekranu akustycznego podwieszzonego w przejściu w strefie F)

Po dodatkowym wobec adaptacji akustycznej 6 uwzględnieniu ekranu akustycznego podwieszzonego w przejściu w strefie F, we wszystkich strefach A, B, C, D oraz E i F, tzn. w całym pomieszczeniu, są dobre właściwości akustyczne (rycina 3, tabele 5 i 6). Poprawę właściwości akustycznych po zastosowaniu ekranu podwieszzonego w strefie F można także zaobserwować na rycinach 5b i 5c.

Podsumowując wyniki badań w rozpatrywanym pomieszczeniu, stwierdzono, że dźwiękochłonny sufit podwieszany, materiał dźwiękochłonny na wewnętrznych ścianach pomieszczenia, ekrany akustyczne na biurkach, ekrany akustyczne rozdzielające grupy stanowisk pracy, ekrany akustyczne w ciągach pieszych oraz ekran podwieszony umożliwiają uzyskanie dobrych właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space.

Przeprowadzone badania wskazują, że na właściwości akustyczne biurowego pomieszczenia open space (oraz na środowisko akustyczne w tym pomieszczeniu) ma wpływ wiele czynników. Jednym z nich jest adaptacja akustyczna pomieszczenia.

Elementy adaptacji akustycznej w różnym stopniu wpływają na właściwości akustyczne pomieszczenia. Największy wpływ na uzyskanie dobrych właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space ma dźwiękochłonny sufit podwieszany, bez którego praktycznie nie jest możliwe uzyskanie odpowiednio dużej chłonności akustycznej pomieszczenia. Drugim elementem adaptacji akustycznej, bez którego uzyskanie dobrych właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space (przede wszystkim uzyskania odpowiednich wartości wielkości kryterialnej spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości, ale także promienia rozproszenia), są ekrany akustyczne. Te dwa rodzaje elementów adaptacji akustycznej są konieczne, choć mogą być niewystarczające do uzyskania dobrych właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space. Dlatego trzeba wziąć pod uwagę zastosowanie innych elementów adaptacji akustycznej, takich

jak: dźwiękochłonna wykładzina podłogowa oraz materiały/wyroby dźwiękochłonne na ścianach pomieszczenia. Na właściwości akustyczne pomieszczenia mają wpływ także liczba, wielkość i położenie materiałów/wyrobów dźwiękochłonnych, a także ich właściwości akustyczne. W niektórych przypadkach dla uzyskania dobrych właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space może być także konieczne zapewnienie odpowiedniego tła akustycznego. Wynika z tego, że adaptacja akustyczna biurowego pomieszczenia open space wymaga uwzględnienia dużej liczby różnych elementów adaptacji akustycznej i dlatego stosowanie metod obliczeniowych jest konieczne.

Podsumowanie wyników badań

Zastosowanie adaptacji akustycznej w biurowych pomieszczeniach open space umożliwia uzyskanie wymaganych przepisami (PN-B-02151-4:2015 [23] i PN-EN ISO 3382-3:2012 [19]) właściwości akustycznych pomieszczeń, a w konsekwencji odpowiedniego do pracy biurowej akustycznego środowiska pracy. Elementami adaptacji akustycznej są: dźwiękochłonny sufit podwieszany, dźwiękochłonne materiały/wyroby na ścianach pomieszczenia, ekrany akustyczne przy stanowiskach pracy, ekrany akustyczne rozdzielające grupy stanowisk pracy, ekrany rozdzielające nawy pomieszczenia oraz ekrany w ciągach pieszych. Największy wpływ na uzyskanie odpowiednich właściwości akustycznych pomieszczeń open space ma dźwiękochłonny sufit podwieszany, a w drugiej kolejności ekrany akustyczne. Bez tych elementów nie jest możliwe uzyskanie dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia open space. Dlatego w przypadku projektowania nowych biurowych pomieszczeń open space lub modernizacji istniejących konieczne jest uwzględnienie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego (najlepiej o wartości ważonego wskaźnika pochłaniania dźwięku nie mniejszej niż 0,9, zawieszonym w minimalnej odległości od stropu 0,2 m). Nie można jednoznacznie określić wytycznych odnoszących się do ekranów akustycznych. Ich liczbę, położenie, wielkość (w tym wysokość) oraz właściwości dźwiękochłonne powierzchni ekranów akustycznych trzeba weryfikować obliczeniowo, oceniając właściwości akustyczne całego pomieszczenia. Jednak można wskazać, że ekrany akustyczne powinny znajdować się jak najbliżej stanowisk pracy; ich szerokość musi być większa niż wysokość, a górna krawędź nie powinna być w mniejszej odległości od podłogi niż 1,5 m (ekrany o wysokości <1,2 m, tj. wysokości osoby siedzącej, praktycznie nie wpływają na właściwości akustyczne pomieszczenia).

Właściwości dźwiękochłonne powierzchni ekranów powinny być jak największe (jednak nawet ekrany o słabych właściwościach dźwiękochłonnych, np. wykonane ze szkła, pleksi lub poliwęglanu, będą miały istotny wpływ na właściwości akustyczne pomieszczenia). Samo zastosowanie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego w pomieszczeniu oraz ekranów akustycznych może nie wystarczać do uzyskania dobrych właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space. W takim wypadku konieczne będzie zastosowanie dźwiękochłonnej wykładziny podłogowej i/lub materiałów/wyrobów dźwiękochłonnych na ścianach pomieszczenia. Ich właściwości dźwiękochłonne powinny być jak największe (wartość ważonego wskaźnika pochłaniania dźwięku materiałów zastosowanych na ścianach powinna być nie mniejsza niż 0,6). W przypadku konieczności ograniczenia ilości materiałów dźwiękochłonnych na ścianach pomieszczenia, największą poprawę właściwości akustycznych pomieszczenia uzyska się, stosując materiały dźwiękochłonne na przeciwległych ścianach do ścian z oknami. W niektórych wypadkach, gdy poziom dźwięku A tła akustycznego (bez obecności ludzi) w biurowych pomieszczeniach open space jest znacznie mniejszy od 35 dB, w celu uzyskania dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia (także odpowiednich właściwości akustycznego środowiska pracy) konieczne może być zastosowanie źródeł maskujących dźwięki mowy. Wszystkie ww. elementy adaptacji akustycznej wzajemnie wpływają na właściwości akustyczne pomieszczenia, dlatego konieczna jest pewna optymalizacja różnych rozwiązań projektowych (wariantów adaptacji akustycznej), która umożliwi uzyskanie odpowiednich właściwości akustycznych pomieszczenia przy zastosowaniu jak najmniejszej liczby elementów adaptacji akustycznej.

W pomieszczeniach o dużej kubaturze oraz w pomieszczeniach, w których stanowiska pracy są pogrupowane, nie jest konieczne i miarodajne stosowanie kryteriów oceny akustycznej biurowych pomieszczeń open space według PN-EN ISO 3382-3:2012 [19], które wymuszają odpowiednie wartości wielkości kryterialnych w odległościach 4 i 5 m od wzorcowego źródła mowy (wartości poziomu dźwięku A mowy w odległości równej i większej od 4 m, nie większej niż 48 dB, oraz wartości wskaźnika transmisji mowy STI w odległości równej i większej od 5 m, nie większej niż 0,5) oraz wartości spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości nie mniejszej niż 7 dB. W takich pomieszczeniach można zastosować zaproponowane kryterium odnoszące się do separacji akustycznej między

obszarami pracy, w których stanowiska pracy są pogrupowane. Separację tę ocenia się na podstawie określenia w obszarze odbiorczym wielkości charakteryzujących dźwięk mowy, który był emitowany przez wzorcowe źródło mowy w obszarze nadawczym. Wielkościami kryterialnymi są: poziom dźwięku A (powinien być mniejszy od poziomu dźwięku A tła akustycznego bez obecności ludzi, tzn. ok. 35 dB), oraz wskaźnik transmisji mowy STI (musi być mniejszy od 0,45, a wskazane jest, aby był mniejszy od 0,3).

Z punktu widzenia oceny właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space korzystnie jest połączenie dwustopniowych kryteriów oceny akustycznej pomieszczeń podanych w normach PN-B-02151-4:2015 [23] i PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] w 1 kryterium oceny trzystopniowej (złe, słabe, dobre właściwości akustyczne pomieszczenia). Umożliwi to dokładniejszą ocenę właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń open space oraz przyczyni się do zainicjowania szerszych działań zmierzających do poprawy tych właściwości.

WNIOSKI

Spełnienie w biurowych pomieszczeniach open space kryteriów podanych w normach PN-B-02151-4:2015 [23] i PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] potwierdza w nich odpowiednie właściwości akustyczne środowiska pracy. W celu ich uzyskania stosuje się: dźwiękochłonne sufity podwieszane i dźwiękochłonne ekrany akustyczne oraz w wielu wypadkach dodatkowo stosuje się materiały dźwiękochłonne na ścianach i podłodze tych pomieszczeń. W biurowych pomieszczeniach open space, w których poziom dźwięku A tła akustycznego (bez obecności ludzi) jest znacznie mniejszy od 35 dB, konieczne może być także zastosowanie źródeł maskujących dźwięki mowy.

W celu uzyskania prostszej, a jednocześnie dokładniejszej oceny właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space, celowe jest połączenie dotychczas stosowanych kryteriów oceny podanych w normach PN-B-02151-4:2015 [23] i PN-EN ISO 3382-3:2012 [19] w jedno kryterium oceny trzystopniowej.

W ocenie właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń open space o dużej kubaturze, w których stanowiska pracy są pogrupowane, zamiast stosować ww. kryteria, można zastosować bardziej miarodajne kryterium odnoszące się do separacji akustycznej między grupami stanowisk pracy.

W celu zapewnienia odpowiedniego europejskiego standardu akustycznego środowiska pracy w biurowych pomieszczeniach open space wskazane jest w Polsce zrównanie statusu normy PN-EN ISO 3382-3:2012 do statusu normy PN-B-02151-4:2015 przez przywołanie jej w odpowiednim rozporządzeniu.

PIŚMIENNICTWO

1. Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (zał. 2 pkt A). DzU z 2018 r., poz. 1286
2. PN-N-01307:1994. Hałas – Dopuszczalne wartości parametrów hałasu w środowisku pracy—Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1994
3. Mikulski W.: Wyniki badań hałasu w otwartym pomieszczeniu biurowym – case study w pomieszczeniu o dużej chłonności akustycznej. Konferencja XLVII Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki, Oddział Górnośląski PTA oraz Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk. 25 lutego – 1 marca 2019, Szczyrk.
4. PN-B-02151-2:2018. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2018
5. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 14 listopada 2017r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Lp.60a, paragraf 323 ust. 2). DzU z 2017 r., poz. 2285
6. Mikulski W.: Wpływ dźwięku maskującego zrozumiałość mowy na środowisko akustyczne w biurach typu open space - wyniki badań własnych. Bezpiecz. Pr. Nauka Prakt. 2020;12:22–26, <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5757>
7. Mikulski W.: Wpływ tła akustycznego na promień rozproszenia w pomieszczeniach biurowych wielkoprzestrzennych, Konferencja XLVIII Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki, Oddział Górnośląski PTA oraz Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk. 24–28 lutego 2020, Szczyrk
8. Mikulski W.: Warunki akustyczne w pomieszczeniach biurowych open space – zastosowanie środków technicznych w typowym pomieszczeniu. Med. Pr. 2018;69(2):153–165, <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00574>
9. Kim J., Dear R.: Workspace satisfaction: The privacy-communication trade-off in open-plan offices. J. Environ. Psychol. 2013;36:18–26, <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2013.06.007>

10. Zaglauer M., Drotleff H., Liebl A.: Background babble in open-plan offices: A natural masker of disruptive speech? *Appl. Acoust.* 2017;118:1–7, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.11.004>
11. Renz T., Leistner P., Liebl A.: The effect of spatial separation of sound masking and distracting speech sound on working memory performance and annoyance. *Acta Acust. United Acust.* 2018;104(4):611–622, <https://doi.org/10.3813/AAA.919201>
12. Mikulski W.: Acoustic conditions in open plan offices – Pilot test results. *Med. Pr.* 2016;67(5):653–662, <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00425>
13. Davidsson F., Hodsman P.: Speech propagation in open-plan office: A cross over designed field study (#1141 T04 RS2). *Proceeding of the 24th International Congress on Sound and Vibration.* 23–27 lipca 2017, London [Internet]. [cytowany 1 stycznia 2021]. Adres: <https://www.acousticbulletin.com/open-plan-office-acoustics-highlights-from-the-icsv-conference-in-london>
14. Haapakangasa A., Hongisto V.: Distraction distance and perceived disturbance by noise – An analysis of 21 open-plan offices. *J. Acoust. Soc. Am.* 2017;141(1):127–136, <https://doi.org/10.1121/1.4973690>
15. Mikulski W.: Studies on acoustic properties of open-plan office rooms. W: Pleban D. (red.). *Occupational noise and workplace acoustics. Advances in Measurement and Assessment techniques* [Internet]. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York 2020, ss. 173–220 [cytowany 1 stycznia 2021]. Adres: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/studies-acoustic-properties-open-plan-office-rooms-witold-mikulski/e/10.1201/9781003048121-7>
16. Mikulski W.: Computational studies of speech intelligibility in open-plan offices. *Med. Pr.* 2019;70(3):327–342, <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00726>
17. Mikulski W.: Projektowanie adaptacji akustycznej otwartych pomieszczeń do prac administracyjnych. Część 2. Projektowanie dodatkowe. *Mater. Bud.* 2019;9:82–85, <https://doi.org/10.15199/33.2019.09.07>
18. PN-EN ISO 17624:2008. Akustyka – Wytyczne dotyczące ograniczania hałasu w biurach i pomieszczeniach pracy za pomocą ekranów akustycznych. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008
19. PN-EN ISO 3382-3:2012, Akustyka – pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – część 3: Pomieszczenia biurowe typu “open space”. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012
20. Cabrera D., Yadav M., Protheroe D.: Critical methodological assessment of the distraction distance used for evaluating room acoustic quality of open-plan offices. *Appl. Acoust.* 2018;140:132–142, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.05.016>
21. Ebissou A., Parizet E., Chevret P.: Use of the speech transmission index for the assessment of sound annoyance in open-plan offices. *Appl. Acoust.* 2015;88:90–95, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.07.012>
22. Yu J. X., Wang S. P., Qiu X. J., Shaid A., Wang L.J.: Contributions of various transmission paths to speech privacy of open ceiling meeting rooms in open-plan offices. *Appl. Acoust.* 2016;112:59–69, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.05.002>
23. PN-B-02151-4:2015. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2015
24. Kostallari K., Parizet E., Chevret P., Amato J.N., Galy E.: Irrelevant speech effect in open plan offices: A laboratory study. *Proceeding of the 24th International Congress on Sound and Vibration.* 23–27 lipca 2017, London [Internet]. [cytowany 1 stycznia 2021]. Adres: <https://arxiv.org/abs/1903.11386>
25. PN-EN 60268-16:2011. Urządzenia systemów elektroakustycznych – Część 16: Obiektywna ocena zrozumiałości mowy za pomocą wskaźnika transmisji mowy. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2011
26. PN-EN ISO 9921:2005. Ergonomia – Ocena porozumiewania się mową. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2005
27. Mikulski W.: Materiały informacyjne. Wyniki przeprowadzonych badań maskowania dźwięków mowy oraz technicznych środków kształtowania pola akustycznego w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych [Internet]. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2020 [cytowany 1 stycznia 2021]. Adres: https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/91357/2SP05_2020_Mikulski_MateriałyInformacyjne.pdf
28. PN-EN ISO 3382-2:2010. Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2010
29. ODEON 16. Computer software [Internet]. Odeon A/S, 2021 [cytowany 1 stycznia 2021]. Adres: <https://odeon.dk>

Ten utwór jest dostępny w modelu open access na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – Użycie niekomercyjne 3.0 Polska / This work is available in Open Access model and licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Poland License – <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/pl>.