

Witold Mikulski

Badania obliczeniowe
maskowania dźwięków mowy
oraz technicznych środków
kształtowania pola akustycznego
w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych



Materiały informacyjne CIOP-PIB

Badania obliczeniowe maskowania dźwięków mowy oraz technicznych środków kształtowania pola akustycznego w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych

Opracowano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w 2020 r. w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Zadanie 2.SP.05: Opracowanie źródła dźwięku maskującego hałas związany z komunikacją werbalną w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych

Autor:

dr hab. inż. Witold Mikulski – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Wibroakustyki

Autor zdjęcia na okładce: Bartosz Makowski

© Copyright by

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2020

CIOP  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. (48-22) 623 36 98, www.ciop.pl

Spis treści

1. Metoda oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wielkoprzestrzennych.....	3
1.1. Metoda oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wielkoprzestrzennych według PN-B-02151-4:2015 i PN EN ISO 3382-3:2012 oraz PN-B-02151-2:2018.....	3
1.2. Propozycja trójstopniowego kryterium oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wielkoprzestrzennych	9
1.3. Propozycja metody zastosowania trójstopniowego kryterium oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wielkoprzestrzennych do pomieszczeń o dużych wymiarach	10
2. Maskowanie dźwięków mowy w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych.....	11
2.1. Wstęp	11
2.2. Metoda badań wpływu różnych dźwięków maskujących na właściwości akustyczne pomieszczenia biurowego.....	12
2.3. Charakterystyka biurowego pomieszczenia wielkoprzestrzennego, w którym przeprowadzono badania	12
2.4. Uwzględniane w badaniach dźwięki maskujące	13
2.5. Wynik badań	14
2.6. Podsumowanie wyników badań maskowania dźwięku.....	16
3. Techniczne środki kształtowania pola akustycznego w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych o dużej kubaturze	18
3.1. Wprowadzenie	18
3.2. Metoda badań.....	18
3.3. Obiekt, w którym wykonano badania	19
3.4. Zakres badań	19
3.5. Wyniki badań	22
3.6. Omówienie wyników	27
3.7. Podsumowanie wyników badań adaptacji akustycznej pomieszczenia	28
4. Podsumowanie.....	29
5. Wnioski.....	30

1. Metoda oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wieloprzestrzennych

1.1. Metoda oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wieloprzestrzennych według PN-B-02151-4:2015 i PN EN ISO 3382-3:2012 oraz PN-B-02151-2:2018

Metoda oceny właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia wieloprzestrzennego (często nazywanego biurowym open space) polega na porównaniu wielkości fizycznych charakteryzujących właściwości akustyczne pomieszczenia z wielkościami dopuszczalnymi. Ponieważ wielkości tych jest kilka, dlatego ocenę tą można określić, jako wieloparametryczną, która jest składową ocen cząstkowych. Każda z ocen cząstkowych odnosi się do jednej wielkości charakteryzującej właściwości akustyczne pomieszczenia. Ocena pozytywna biurowego pomieszczenia wieloprzestrzennego jest wówczas, gdy wszystkie oceny cząstkowe są pozytywne.

Wielkości charakteryzujące właściwości akustyczne pomieszczenia stosowane do oceny cząstkowej dalej określane są jako wielkości kryterialne. Ich wartości dopuszczalne, tzn. kryteria określone są w normie PN-B-02151-4:2015 Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach (norma obligatoryjna w Polsce, przywołana w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 14 listopada 2017 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie) oraz w normie PN EN ISO 3382-3:2012 Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 3: Pomieszczenia biurowe typu open space (norma nieobligatoryjna). Ponadto w normie PN-B-02151-2:2018 Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach (zastępuje ona normę PN-B-02151-02:1987 – norma obligatoryjna, przywołana w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 14 listopada 2017 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie) określone są wartości dopuszczalne hałasu tła akustycznego zależne od wyposażenia technicznego budynku.

Kryterium cząstkowe nr 1 oceny właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia wielkoprzestrzennego (ujęte w PN-B-02151-4:2015) określa tzw. minimalne właściwości akustyczne biurowego pomieszczenia wielkoprzestrzennego, przez podanie:

1. Wartości **minimalnej chłonności akustycznej pomieszczenia** $A_{f,min,dop}$ (w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych $f = 500, 1000$ i 2000 Hz), w m^2 . Chłonność akustyczna pomieszczenia A_f musi spełniać warunek:

$$A_f \geq A_{f,min,dop} = 1,1 \cdot S_p \quad (1.1-1)$$

gdzie:

- $A_{f,min,dop}$ – wartość minimalna chłonności akustycznej pomieszczenia, m^2 ,
- S_p – pole powierzchni rzutu pomieszczenia (podłogi), m^2 ,
- f – częstotliwość środkowa oktaowych pasm częstotliwości $f = 500, 1000$ i 2000 Hz.

Kryteria cząstkowe nr 2, 3 i 4 oceny właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia wielkoprzestrzennego, podane w normie EN ISO 3382-3:2012, określone są dla tzw. dobrych właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia wielkoprzestrzennego. Są one następujące:

2. Wartość **poziomu dźwięku A mowy w odległości 4 m** $L_{p,A,S,4 m}$ od wzorcowego źródła mowy [określana z logarytmicznej linii (funkcji) interpolującej wyniki pomiaru poziomu dźwięku A w funkcji odległości od wzorcowego źródła mowy $L_{p,A,S}(r) = a_1 \cdot \log(r) + b_1$; rys. 1.1-1] nie może przekroczyć wartości maksymalnego dopuszczalnego poziomu dźwięku A w odległości 4 m $L_{p,A,S,4 m,dop}$

$$L_{p,A,S,4 m} \leq L_{p,A,S,4 m,maxdop} = 48 \text{ dB} \quad (1.1-2)$$

gdzie:

- $L_{p,A,S,4 m,maxdop}$ – wartość maksymalna dopuszczalna poziomu dźwięku A w odległości 4 m, dB.

3. Wartość **spadku poziomu dźwięku A przy podwojeniu odległości** $D_{2,S}$ od wzorcowego źródła mowy [określana z logarytmicznej linii (funkcji) interpolującej wyniki pomiaru poziomu dźwięku A w funkcji odległości od wzorcowego źródła mowy; $D_{2,S} = L_{p,A,S,1 m} - L_{p,A,S,2 m}$; rys. 1.1-1] nie może być mniejsza niż wartość minimalna spadku poziomu dźwięku A przy podwojeniu odległości $D_{2,S,min,dop}$:

$$D_{2,S} \geq D_{2,S,min,dop} = 7 \text{ dB} \quad (1.1-3)$$

gdzie:

$D_{2,S,\text{mindop}}$ – wartość minimalna spadku poziomu dźwięku A przy podwojeniu odległości, dB.

4. Wartość **promienia rozproszenia** r_D (odległość od wzorcowego źródła mowy, w której wartość wskaźnika transmisji mowy $STI = 0,5$ [określanego z liniowej linii (funkcji) interpolującej wyniki pomiaru wskaźnika transmisji mowy STI w funkcji odległości od wzorcowego źródła mowy $STI(r) = a_2 \cdot r + b_2$; rys. 1.1-2]) nie może przekroczyć wartości maksymalnej promienia rozproszenia $r_{D,\text{maxdop}}$:

$$r_D \leq r_{D,\text{maxdop}} = 5 \text{ m} \quad (1.1-4)$$

gdzie:

$r_{D,\text{maxdop}}$ – wartość maksymalna promienia rozproszenia, m .

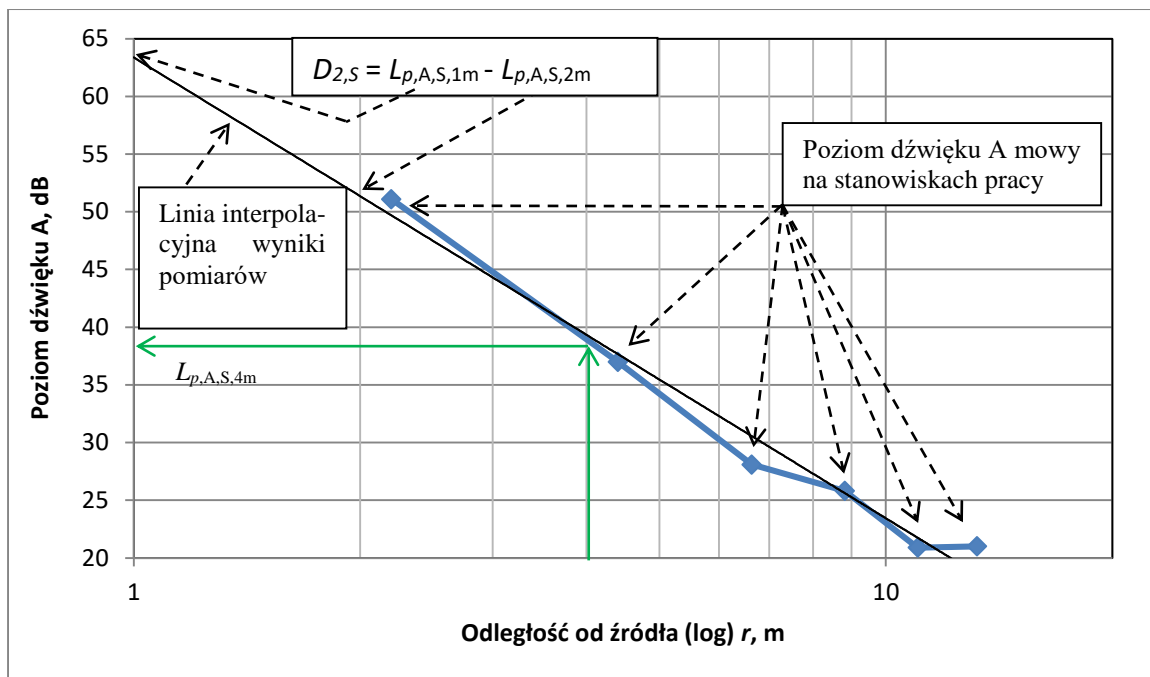
5. Wartość **promienia prywatności** r_p [odległość od wzorcowego źródła mowy, w której wartość wskaźnika transmisji mowy $STI = 0,2$ (określana z liniowej linii (funkcji) interpolującej wyniki pomiaru wskaźnika transmisji mowy STI w funkcji odległości od wzorcowego źródła mowy $STI(r) = a_2 \cdot r + b_2$; rys. 1.1-2)]. Warunek ten ma postać:

$$r_p \leq r_{p,\text{maxdop}} = ? \quad (1.1-5)$$

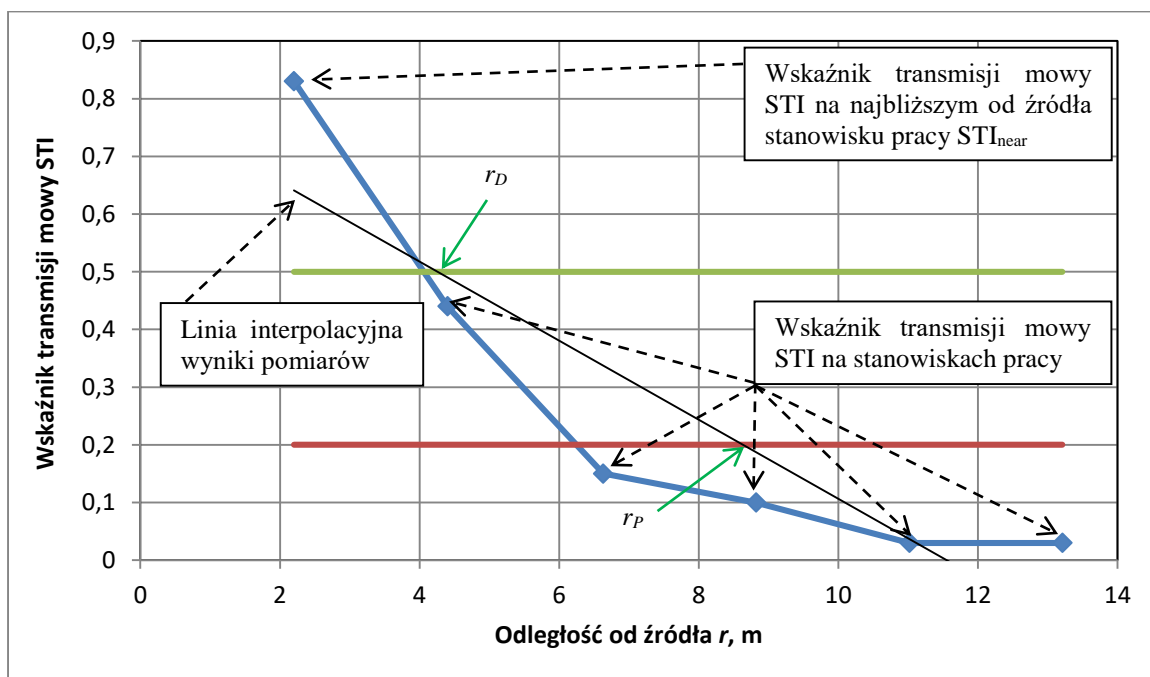
gdzie:

$r_{p,\text{maxdop}}$ – wartość maksymalna promienia prywatności, m.

Maksymalnej wartości promienia prywatności $r_{p,\text{maxdop}}$ nie określono w normie PN EN ISO 3382-3:2012 i w związku z tym w niniejszych materiałach tej wielkości się nie stosuje.



Rys. 1.1-1. Poziom dźwięku A w funkcji odległości od wzorcowego źródła mowy



Rys. 1.1-2. Wskaźnik transmisji mowy STI w funkcji odległości od wzorcowego źródła mowy

Na wartość wskaźnika transmisji mowy STI (w tym STI_{near}) oraz promienia rozproszenia r_D (także promienia prywatności r_P), poza właściwościami akustycznymi pomieszczenia, ma wpływ tło akustyczne w pomieszczeniu. Dlatego konieczne jest jego uwzględnienie.

Równoważny poziom dźwięku A tła akustycznego nie może przekroczyć poziomu dopuszczalnego, którego wartość maksymalna równoważna $L_{p,A,eq,maxdop}$ zależy od wzorcowego maksymalnego (najwyższego dopuszczalnego) poziomu dźwięku A tła $L_{p,A,eq,nT}$ podanego w PN-B-02151-2:2018 oraz zależy od czasu pogłosu pomieszczenia (wzór 1.1-6). Kryterium na równoważny poziom dźwięku A tła akustycznego $L_{p,A,eq}$ w biurowym pomieszczeniu wielkoprzestrzennym ma postać:

$$L_{p,A,eq} \leq L_{p,A,eq,maxdop} = L_{p,A,eq,nT} + 10 \cdot \log \left(\frac{T_{500-2000 \text{ Hz,obl}}}{T_{500-2000 \text{ Hz,maxdop}}} \right) \quad (1.1-6)$$

gdzie:

$L_{p,A,eq,maxdop}$ – maksymalny dopuszczalny równoważny poziom dźwięku A tła akustycznego, dB,

$L_{p,A,eq,nT}$ – wzorcowy maksymalny (najwyższy dopuszczalny) poziom dźwięku A, tła akustycznego, dB; wg PN-B-02151-2:2018, dla biur wielkoprzestrzennych oraz pokoi biurowych typu open space wynosi on 40 dB,

$T_{500-2000 \text{ Hz,obl}}$ – średni czas pogłosu rozpatrywanego pomieszczenia, z czasów pogłosu w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500, 1000, 2000 Hz, sekundy (obliczony lub zmierzony),

$T_{500-2000 \text{ Hz,maxdop}}$ – średni czas pogłosu z maksymalnych dopuszczalnych czasów pogłosu w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500, 1000, 2000 Hz, sekundy (określony dla rozpatrywanego pomieszczenia z zależności 1.2-2).

Powyższe kryteria podano w tabeli 1.1-1.

Tabela 1.1-1. Kryteria oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wielkoprzestrzennych (dotychczas stosowane)

Wielkość kryterialna	Właściwości akustyczne pomieszczenia		
	PN-B-02151-4:2015 – minimalne warunki akustyczne	PN EN ISO 3382-3:2012 – dobre właściwości akustyczne	PN-B-02151-2:2018 – minimalne warunki akustyczne dla wyposażenia technicznego
Chłonność akustyczna pomieszczenia A_f ($f = 500, 1000, 2000 \text{ Hz}$)	$1,1 \cdot S_p = A_{f,mindop} \leq A_f$		
Poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m $L_{p,A,S,4 \text{ m}}$		$L_{p,A,S,4 \text{ m}} \leq 48 \text{ dB}$	
Spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości $D_{2,S}$		$7 \text{ dB} \leq D_{2,S}$	
Promień rozproszenia r_D		$r_D \leq 5 \text{ m}$	
Równoważny poziom dźwięku A tła akustycznego $L_{p,A,eq}$			$L_{p,A,eq} \leq L_{p,A,eq,maxdop}$

gdzie:

$A_{f,\text{mindop}}$ – minimalna dopuszczalna chłonność akustyczna pomieszczenia, w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych $f = 500, 1000$ i 2000 Hz, m^2 ,

S_p – pole powierzchni rzutu pomieszczenia (podłogi), m^2 ,

$L_{p,A,\text{eq,maxdop}}$ – maksymalny dopuszczalny równoważny poziom dźwięku A tła akustycznego obliczony ze wzoru 1.1-6, dB. (np. w biurowych pomieszczeniach wieloprzestrzennych, dla średniej wartości czasu pogłosu z częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz równej 0,25 s, wynosi 37 dB).

1.2. Propozycja trójstopniowego kryterium oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wieloprzestrzennych

Kryterium cząstkowym nr 1 (zależność 1.1-1), określającym *minimalną chłonność akustyczną pomieszczenia* – biurowego pomieszczenia wieloprzestrzennego, trudno jest się posługiwać, ponieważ jego wartość kryterialna zależy od wymiarów pomieszczenia. Dlatego w tym materiale zaproponowano, żeby kryterium to sformułować w innej postaci – w odniesieniu do tzw. minimalnej chłonności akustycznej pomieszczenia odniesionej do powierzchni jednostkowej podłogi $A_{1\text{m}^2,f,\text{mindop}}$, w m^2 , w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych $f = 500, 1000$ i 2000 Hz. Wówczas kryterium cząstkowe 1 ma postać:

$$A_{1\text{m}^2,f,\text{mindop}} \geq 1,1 \text{ m}^2. \quad (1.2-1)$$

W symulacyjnych obliczeniach numerycznych w programach komputerowych zamiast stosować kryteria odnoszące się do chłonności akustycznej pomieszczenia (1.1-1 i 1.2-1) wygodniej jest stosować kryterium dotyczące maksymalnego dopuszczalnego czasu pogłosu $T_{f,\text{maxdop}}$. Wówczas kryterium cząstkowe 1 odnosi się do czasu pogłosu T_f , w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych $f = 500, 1000$ i 2000 Hz, w sekundach. Ma ono postać:

$$T_f \leq T_{f,\text{maxdop}} = \frac{0,161 \cdot V}{A_{f,\text{mindop}}} = \frac{0,161 \cdot V}{1,1 \cdot S_p} = 0,146 \cdot H \quad (1.2-2)$$

gdzie:

$T_{f,\text{maxdop}}$ – maksymalny dopuszczalny czas pogłosu pomieszczenia, w oktaowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej $f = 500, 1000$ i 2000 Hz, sekundy,

V – kubatura pomieszczenia, m^3 ,

$A_{f,\text{mindop}}$ – minimalna dopuszczalna chłonność akustyczna pomieszczenia, w oktaowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej $f = 500, 1000$ i 2000 Hz, m^2 ,

S_p – pole powierzchni rzutu pomieszczenia (podłogi), m^2 ,

H – wysokość pomieszczenia, metry (ponieważ większość biurowych pomieszczeń wieloprzestrzennych ma wysokość $H = 3,5$ m, to wówczas dla tych pomieszczeń maksymalny dopuszczalny czas pogłosu jest równy 0,51 s).

Łącząc kryteria oceny minimalnych właściwości akustycznych wg PN-B-02151-4:2015 i dobrych właściwości akustycznych wg PN EN ISO 3382-3:2012 (przy czym wartości nieokreślone uzyskano metodą ekstrapolacji z danych określających wartości wielkości kryterialnych uzyskanych metodami pomiarowymi), otrzymuje się trzystopniowe kryterium oceny właściwości akustycznych pomieszczenia – tabela 1.2-1. Dalej kryterium to nazywa się kryterium nr I.

Tabela 1.2-1. Kryterium nr I oceny trzystopniowej właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wielkoprzestrzennych

Wielkość kryterialna	Właściwości akustyczne pomieszczenia		
	Niewystarczające / złe	Słabe / dostateczne	dobre
A_{1m2} (500, 1000, 2000 Hz)	$A_{1m2,f} < 1,1 \text{ m}^2$	$1,1 \text{ m}^2 \leq A_{1m2,f} < 1,5 \text{ m}^2$	$1,5 \text{ m}^2 \leq A_{1m2,f}$
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	$10 \text{ m} < r_D$	$5 \text{ m} < r_D \leq 10 \text{ m}$	$r_D \leq 5 \text{ m}$

Oznaczenia :

$A_{1m2,f}$ – chłonność akustyczna odniesiona do pola powierzchni jednostkowej podłogi (rzutu pomieszczenia), m^2 ,

T_f - czas pogłosu, w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych $f = 500, 1000$ i 2000 Hz, sekundy,

* – wartość względna (podano wartości dla wysokości pomieszczenia $H = 3,5$ m; zależność 1.2-2),

$L_{p,A,S,4 \text{ m}}$ – poziom dźwięku A w odległości 4 m, dB,

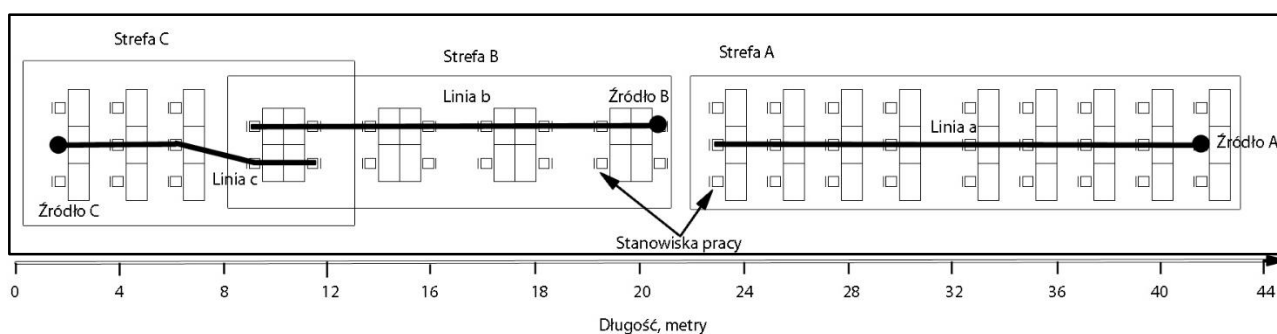
$D_{2,s}$ – spadek poziomu dźwięku przy podwojeniu odległości, dB,

r_D – promień rozproszenia, m.

1.3. Propozycja metody zastosowania trójstopniowego kryterium oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wielkoprzestrzennych do pomieszczeń o dużych wymiarach

W tym rozdziale zaproponowano metodę postępowania przy ocenie właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wielkoprzestrzennych o kubaturze ponad 800 m^3 .

Istota wielkości kryterialnych oceny właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wieloprzestrzennych podanych w PN-B-02151-4:2015 i PN EN ISO 3382-3:2012 (rozdziały 1.1 oraz 1.2) powoduje, że charakteryzują one średnie właściwości akustyczne całego pomieszczenia. Sposób określania tych wielkości (w szczególności wg PN EN ISO 3382-3:2012) narzuca konieczność uwzględnienia w ocenie od 4 do 10 punktów obliczeniowych lub pomiarowych (miejsc/stanowisk pracy), przy czym odległość najdalej oddalonego punktu obliczeniowego lub pomiarowego od źródła nie może być większa od 16 m. Uwzględniając minimalną odległość źródła i stanowisk pracy od ścian pomieszczenia warunek ten określa, że obszar z którego uwzględnia się wyniki badań ma najdłuższy wymiar liniowy ok. 22 m. Przy standardowej wysokości tego typu pomieszczeń ok. 3,5 m oraz szerokości pomieszczeń umożliwiającej umieszczenie w nich od 2 do 5 stanowisk pracy w jednym rzędzie (odpowiada to szerokości pomieszczenia ok. 5–10 m) maksymalna kubatura pomieszczeń wynosi ok. 770 m³. Wynika z tego, że w pomieszczeniach o większej kubaturze ich właściwości akustyczne określa się na podstawie badań z części obszaru. Jest to uproszczenie, które wymaga uściślenia stosowanej tam metody oceny właściwości akustycznych pomieszczenia. Zaproponowano, aby pomieszczenie o dużej kubaturze podzielić na części, tj. obszary, w których można oceniać ich właściwości akustyczne stosując metodę podaną w EN ISO 3382-3:2012. Ocena całego pomieszczenia (wypadkowa) jest wynikiem ocen składowych (mniejszych obszarów/stref), przy czym wypadkowa ocena wynika z najgorszej z ocen składowych (rys. 1.2-1).



Rys. 1.2-1. Strefy do oceny cząstkowej właściwości akustycznych pomieszczenia (liniami grubymi zaznaczono linie przechodzące przez stanowiska pracy, na których określa się wielkości do oceny właściwości akustycznych pomieszczenia wg PN EN ISO 3382-3:2012)

Pomieszczenie na rys. 1.2-1, z punktu widzenia tylko jego wymiarów (dłuższy wymiar liniowy równy 44 m) należy podzielić na co najmniej dwa obszary/strefy podlegające ocenie. Jednak przy niejednorodnej aranżacji stanowisk pracy bardziej właściwy jest podział na trzy strefy (A, B i C). W strefach A i B stanowiska pracy rozmieszczone są równomiernie. Problem jest z wyznaczeniem

właściwości obszaru po lewej stronie rys. 1.2-1, gdzie zgrupowanych jest 9 stanowisk pracy. Nie można wyznaczyć strefy obejmującej tylko tych 9 stanowisk, ponieważ na linii pomiarowej oprócz wzorcowego źródła dźwięku można by było uwzględnić tylko 2 stanowiska (a wg PN EN ISO 3382-3:2012 minimalna liczba stanowisk pracy wynosi 4). Aby jednak nie pomijać tego obszaru (9 stanowisk) w ocenie, należy rozszerzyć strefę C w taki sposób, by poza tymi 9 stanowiskami objęta także 4 następne. Wówczas linia pomiarowa *c* przechodzi poza źródłem przez 4 stanowiska pracy. Takie podejście powoduje zmniejszenie dokładności oceny lokalnych właściwości pomieszczenia w obszarze tych 9 stanowisk pracy, jednak umożliwia uwzględnienie w ocenie wszystkich obszarów w pomieszczeniu.

2. Maskowanie dźwięków mowy w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych

2.1. Wstęp

W biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych hałas nie powoduje zagrożenia słuchu pracowników, ponieważ równoważne poziomy dźwięku A hałasu w tych pomieszczeniach zawierają się w zakresie 45–53 dB, a poziom dopuszczalny ze względu na ochronę słuchu wynosi 85 dB (poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy, wg Rozporządzenia Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dn. 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy). W większości przypadków w tych pomieszczeniach także nie jest przekraczany poziom dopuszczalny hałasu ze względu na możliwość realizacji podstawowych zadań pracy, tj. 55 dB (równoważny poziom dźwięku A na stanowisku pracy, wg PN-N-01307: 1994). Negatywne oddziaływanie hałasu w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych wynika z tego, że rozmowy pracowników absorbują uwagę innych pracowników, którzy nie biorą w nich udziału. Dlatego charakteryzując hałas na stanowiskach pracy w pomieszczeniach biurowych wielkoprzestrzennych opisuje się go: poziomem dźwięku (intensywność) oraz identyfikowalnymi bodźcami dźwiękowymi (w tym głównie treściami słownymi). Intensywność hałasu określa się poziomem dźwięku A: na stanowiskach pracy wg PN-N-01307: 1994 i w pomieszczeniach pracy (głównie od wyposażenia technicznego budynku) wg PN-B-

02151-2:2018 (norma ta zastąpi obecnie obowiązującą PN-B-02151-02:1987). Wpływ drugiej cechy znacznie trudniej jest scharakteryzować. Przyjmuje się, że należy dążyć do minimalizowania słyszalności dźwięków niepożądanych lub maskowania ich zrozumiałości.

2.2. Metoda badań wpływu różnych dźwięków maskujących na właściwości akustyczne pomieszczenia biurowego

Badano wpływ dźwięków maskujących, o różnych poziomach i różnym charakterze widma akustycznego, na właściwości akustyczne biurowego pomieszczenia wieloprzestrzennego. Badanie przeprowadzono metodą obliczeniową, wykorzystując narzędzie obliczeniowe w postaci komputerowego programu ODEON.

Wielkością stosowaną w ocenie właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia wieloprzestrzennego, a jednocześnie skuteczności maskowania dźwięku mowy w tym pomieszczeniu, przyjęto promień rozproszenia r_D . Wartość kryterialną przyjęto z tabeli 1.2-1, dla dobrych właściwości akustycznych. Wynosi ona $r_{D,max} = 5$ m.

Wartość maksymalną dopuszczalną równoważnego poziomu dźwięku A tła akustycznego (w tym tła istniejącego oraz dźwięku maskującego) $L_{p,A,eq,maxdop}$ w badanym pomieszczeniu określono ze wzoru 1.1-6), tj.:

$$L_{p,A,eq,maxdop} = L_{p,A,eq,nT} + 10 \cdot \log\left(\frac{T_{500-2000Hz,obl}}{T_{500-2000Hz,max}}\right) = 40 + 10 \cdot \log\left(\frac{0,21s}{0,51s}\right) = 40 - 2,9 = 37,1 \text{ dB} \quad (2.2-1)$$

gdzie

$L_{p,A,eq,nT}$ – wzorcowy maksymalny (najwyższy dopuszczalny) poziom dźwięku A tła akustycznego, dB; wg PN-B-02151-2:2018, dla „biur wieloprzestrzennych oraz pokoi biurowych typu open space” wynosi on 40 dB,

$T_{500-2000 \text{ Hz},obl}$ – średni czas pogłosu rozpatrywanego pomieszczenia, z czasów pogłosu w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500, 1000, 2000 Hz, sekundy (rozpatrywanego pomieszczenia 0,21 s),

$T_{500-2000 \text{ Hz},maxdop}$ – maksymalny dopuszczalny średni czas pogłosu (z czasów pogłosów w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500, 1000, 2000 Hz), sekundy, określony dla rozpatrywanego pomieszczenia z zależności 1.2-2, tj. 0,51 s).

2.3. Charakterystyka biurowego pomieszczenia wieloprzestrzennego, w którym przeprowadzono badania

Wymiary rozpatrywanego biurowego pomieszczenia wieloprzestrzennego to 22x10x3,5 m, kubatura 770 m³, pole powierzchni rzutu pomieszczenia (podłogi) 220 m². W pomieszczeniu zain-

stalowane były: sufit dźwiękochłonny (na wysokości $h = 3,45$ m, pole powierzchni $207,4$ m²), materiał dźwiękochłonny na czterech ścianach (łącznie pole powierzchni $147,7$ m²) oraz 55 ekranów akustycznych o wysokości $1,7$ m, okalających z trzech stron 55 stanowisk pracy (pole powierzchni po jednej stronie ekranu $5,4$ m²).

Czas pogłosu pomieszczenia w oktaowych pasmach częstotliwości 500 , 1000 i 2000 Hz, zawierał się w zakresie $0,2-0,22$ s (dobre właściwości akustyczne wg tabeli 1.2-1). Poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m $L_{p,A,S,4m}$ od wzorcowego źródła mowy wynosił $38,2$ dB (dobre właściwości akustyczne). Spadek poziomu dźwięku mowy przy podwojeniu odległości (różnica poziomu dźwięku w odległości 1 i 2 m) od wzorcowego źródła mowy $D_{2,S}$ wynosił 7 dB (dobre właściwości akustyczne). Dla tła akustycznego o widmie typu I („naturalne” tło akustyczne niskoczęstotliwościowe; tabela 2.4-1) i poziomie dźwięku A 35 dB, promień rozproszenia r_D wynosił $3,3$ m (dobre właściwości akustyczne).

Rozpatrywane pomieszczenie spełnia więc wszystkie kryteria dla tzw. dobrych właściwości akustycznych (dla tła akustycznego o poziomie 35 dB). W przypadku, gdyby poziom dźwięku A tła akustycznego, o tym samym typie widma, był równy np. 25 dB, to promień rozproszenia r_D byłby równy $8,3$ m (słabe właściwości akustyczne; tabela 1.2-1). Zakładając, że celem jest uzyskanie dobrych właściwości akustycznych, to rozpatrywane pomieszczenie spełnia wszystkie wymagania pod warunkiem odpowiedniego tła akustycznego. Dlatego w przypadku za małego tła akustycznego konieczne jest uwzględnienie dźwięków maskujących.

2.4. Uwzględniane w badaniach dźwięki maskujące

W badaniu uwzględniono cztery typy (nr I, II, III i IV) widm częstotliwości tła akustycznego (zawierające dźwięki maskujące i „naturalne” tło akustyczne). Każde z nich miało poziomy dźwięku A z zakresu $25-37,5$ dB (zgodnie z kryterium zależność 2.2-1 poziom dźwięku A tła akustycznego w rozpatrywanym pomieszczeniu nie może przekroczyć ok. $37,1$ dB).

We wszystkich wariantach tła akustycznego, jako poziom „naturalnego” tła akustycznego (bez dźwięku maskującego) przyjęto widmo typu I o poziomie dźwięku A 25 dB (tabela 2.4-1).

Tabela 2.4-1. Poziom ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości „naturalnego” tła akustycznego (o poziomie dźwięku A 25 dB)

Poziom ciśnienia akustycznego, w dB, w oktaowych pasmach częstotliwości, w Hz								Poziom dźwięku A, w dB
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
45	34	27	20	15	12	10	9	25

Dźwięk tła akustycznego typu I reprezentuje typowy hałas bez obecności ludzi (widmo tabela 2.4-1) o takim poziomie, aby wypadkowy poziom dźwięku A tła akustycznego typu I był równy: 25; 27,5; 30; 32,5; 35 i 37,5 dB.

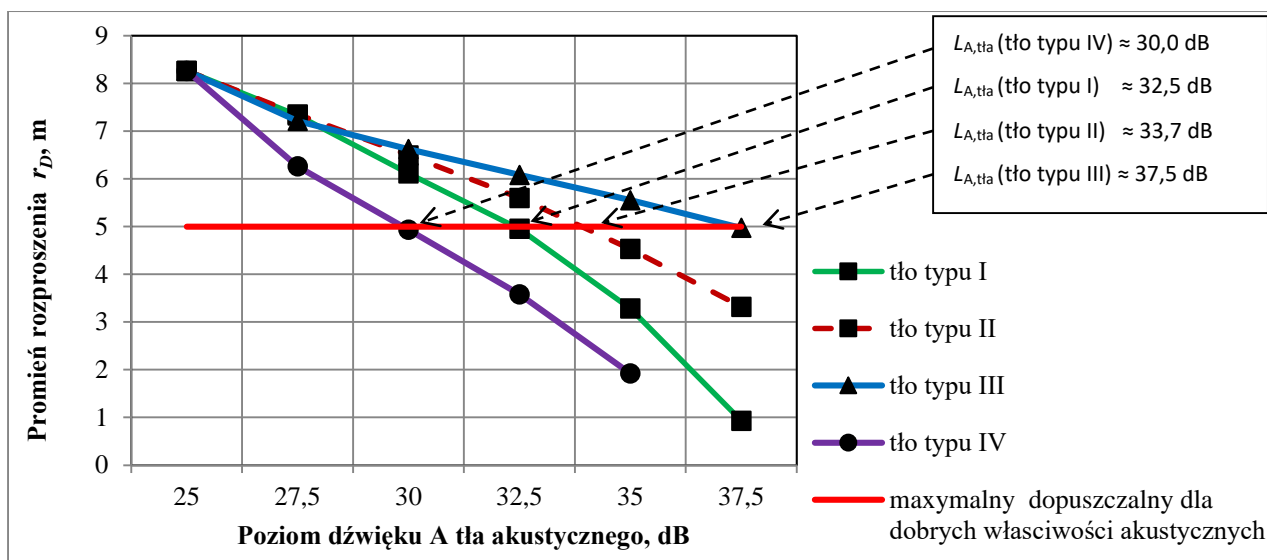
Dźwięk tła akustycznego typu II reprezentuje hałas, którego składowymi są dwa dźwięki: dźwięk tła akustycznego typu I o poziomie dźwięku A 25 dB (tabela 2.4-1) oraz dźwięk mowy (wg PN-EN ISO 3382-3:2012) o takim poziomie, aby wypadkowy poziom dźwięku A tła akustycznego typu II był równy: 25; 27,5; 30; 32,5; 35 i 37,5 dB.

Dźwięk tła akustycznego typu III reprezentuje hałas, którego składowymi są dwa dźwięki: dźwięk tła typu I o poziomie dźwięku A 25 dB (tabela 2.4-1) oraz szumu różowego obejmującego zakres częstotliwości trzech oktaów o częstotliwościach środkowych 500, 1000 i 2000 Hz o takim poziomie, aby wypadkowy poziom dźwięku A tła akustycznego typu III był równy: 25; 27,5; 30; 32,5; 35 i 37,5 dB.

Dźwięk tła akustycznego typu IV reprezentuje hałas, którego składowymi są dwa dźwięki: dźwięk tła typu I o poziomie dźwięku A 25 dB (tabela 2.4-1) oraz szumu różowego obejmującego oktawy o częstotliwościach środkowych z zakresu 63–8000 Hz o takim poziomie, aby wypadkowy poziom dźwięku A tła akustycznego typu IV był równy: 25; 27,5; 30; 32,5; 35 i 37,5 dB.

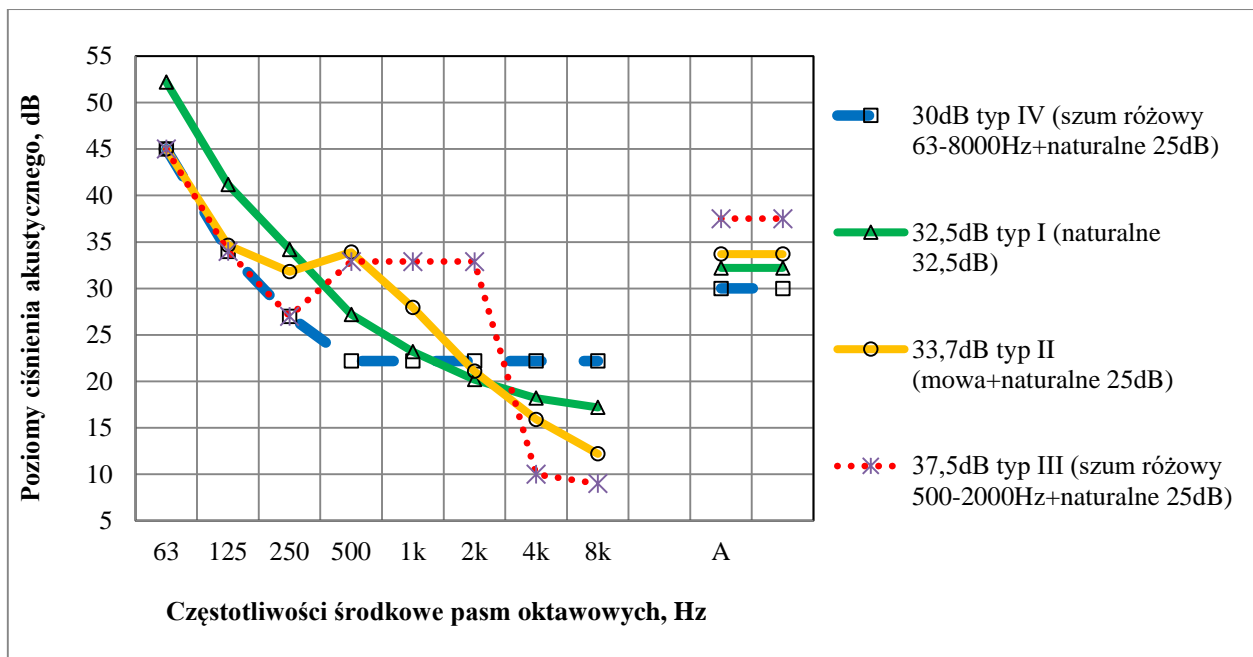
2.5. Wynik badań

Na rys. 2.5-1 podano wynik obliczeń promienia rozproszenia r_D dla dźwięków maskujących podanych w rozdziale poprzednim.



Rys. 2.5-1. Wyniki obliczeń zależności promienia rozproszenia r_D od poziomu dźwięku A tła akustycznego (w tym dźwięku maskującego) dla tła akustycznych typu I-IV

Ponieważ wartość maksymalna dopuszczalna promienia rozproszenia $r_{D,maxdop}$ wynosi 5 m (kryterium dobrych właściwości akustycznych, tabela 1.2-1) to spełnienie tego warunku (co jest równoważne z odpowiednimi dobrymi właściwościami akustycznymi środowiska pracy w tym pomieszczeniu, ponieważ pozostałe kryteria są spełnione – rozdział 2.3) będzie miało miejsce, gdy wypadkowy poziom dźwięku A tła akustycznego (w tym i dźwięku maskującego; rys. 2.5-2): typu I będzie nie mniejsze niż 32,5 dB, typu II – 33,7 dB, typu III – 37,5 dB oraz typu IV – 30 dB. Ponieważ maksymalny poziom dźwięku A tła akustycznego w rozpatrywanym pomieszczeniu wynosi 37,1 dB (zależność nr 2.2-1), to spełniają ten warunek trzy typy widm: z dźwiękiem maskującym o widmie tła naturalnego, o widmie mowy oraz o widmie szumu różowego w zakresie częstotliwości z zakresu 63–8000 Hz. Na rys. 2.5-2 pokazano widma dźwięków maskujących (i tła naturalnego), które spełniają ww. kryteria dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia.



Rys. 2.5-2. Poziomy ciśnienia akustycznego tła akustycznego (w tym dźwięku maskującego) zapewniające w rozpatrywanym biurowym pomieszczeniu wieloprzestrzennym dobre właściwości akustyczne (wartość promienia rozproszenia $r_D \sim 5$ m)

2.6. Podsumowanie wyników badań maskowania dźwięku

Przeprowadzone badania ilustrują zastosowanie dźwięków maskujących w biurowym pomieszczeniu wieloprzestrzennym z wykorzystaniem metod symulacji pola akustycznego. Badania wykonano w biurowym pomieszczeniu wieloprzestrzennym o kubaturze 770 m^3 . Badano wpływ dźwięków maskujących (o różnych poziomach dźwięku A z zakresu 25–37,5 dB i różnym charakterze widma akustycznego) na właściwości akustyczne biurowego pomieszczenia wieloprzestrzennego. Uwzględniono dźwięki maskujące o widmach: typowego (naturalnego) hałasu bez obecności ludzi, dźwięku mowy, szumu różowego obejmującego zakres częstotliwości trzech oktaw z zakresu 500–2000 Hz oraz szumu różowego obejmującego oktawy o częstotliwościach środkowych z zakresu 63–8000 Hz.

Pomieszczenie miało dobre właściwości akustyczne wg PN EN ISO 3382-3:2012, tj.: czas pogłosu pomieszczenia w zakresie częstotliwości 500–2000 Hz zawierał się w granicach 0,2–0,22 s, poziom dźwięku A mowy $L_{p,A,S,4 \text{ m}}$ w odległości 4 m od wzorcowego źródła mowy wynosił 38,2 dB, spadek poziomu dźwięku A mowy (przy) podwojeniu odległości $D_{2,S}$ od wzorcowego źródła mowy wynosił 7 dB oraz promień rozproszenia r_D wynosił 3,3 m (dla poziomu dźwięku A tła akustycznego

35 dB). W przypadku, gdy poziom dźwięku A tła akustycznego byłby równy 25 dB, to promień rozproszenia r_D byłby równy 8,3 m, co nie spełniłoby kryterium dobrych właściwości akustycznych wg PN EN ISO 3382-3:2012. Dlatego badania doboru dźwięku maskującego przeprowadzono zarówno pod względem jego poziomu dźwięku A, jak i charakteru widma częstotliwościowego.

Badania wykazały, że jako dźwięki maskujące zrozumiałość niepożądanych rozmów w biurowym pomieszczeniu wielkoprzestrzennym najbardziej skuteczne, z czterech typów widma częstotliwości, są dźwięki o widmie szumu różowego (w zakresie częstotliwości 63–8000 Hz obejmującym oktawowo pasma częstotliwości). Mniej skutecznym sposobem jest zastosowanie, jako dźwięków maskujących, szumu korygowanego częstotliwościowo zgodnie z charakterem widma naturalnego tła akustycznego (niskoczęstotliwościowe) lub widma mowy. Dla tego pierwszego charakteru widma częstotliwości wystarczające jest zastosowanie dźwięku maskującego o poziomie dźwięku A 30 dB (tj. o ok. 7,1 dB mniejszym niż poziom dopuszczalny tła akustycznego, wg PN-B-02151-2:2018, po uwzględnieniu poprawki na czas pogłosu, tj. 37,1 dB). Efekt skutecznego maskowania można uzyskać stosując dźwięk maskujący o charakterze widma dźwięku tła naturalnego (bez obecności ludzi) i poziomie dźwięku A 32,5 dB (tj. o 4,6 dB mniejszym niż dopuszczalny poziom tła akustycznego).

Dźwięk maskujący umożliwia uzyskanie odpowiednich – dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia – wg PN EN ISO 3382-3:2012, nie powodując przekroczenia poziomów dopuszczalnych hałasu w pomieszczeniu (wg PN-B-02151-2:2018) i na stanowiskach pracy (Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dn. 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy oraz norma PN-N-01307: 1994).

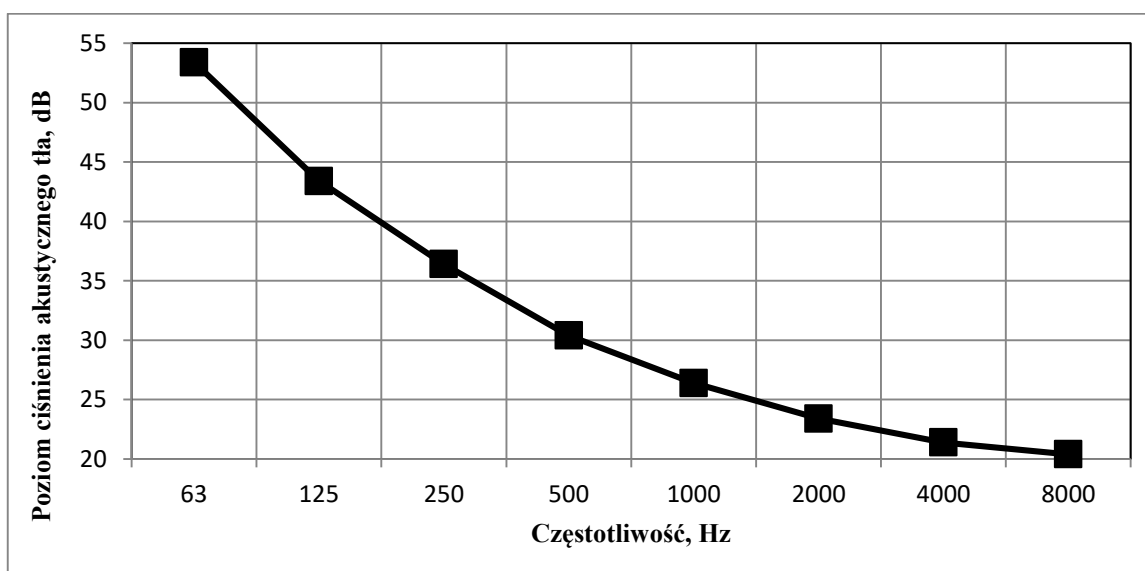
3. Techniczne środki kształtowania pola akustycznego w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych o dużej kubaturze

3.1. Wprowadzenie

Celem badań było uwzględnienie takich elementów adaptacji akustycznej (dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, materiału dźwiękochłonnego na ścianach i podłodze oraz ekranów akustycznych) w biurowym pomieszczeniu wielkoprzestrzennym, aby uzyskać w nim odpowiednie właściwości akustyczne środowiska do pracy biurowej. Kubatura pomieszczenia znacznie przekraczała 800 m³. Ze względu na wielkość, pomieszczenie podzielono na obszary/strefy (zgodnie z metodą podaną w rozdziale 1.3), w których niezależnie oceniano właściwości akustyczne.

3.2. Metoda badań

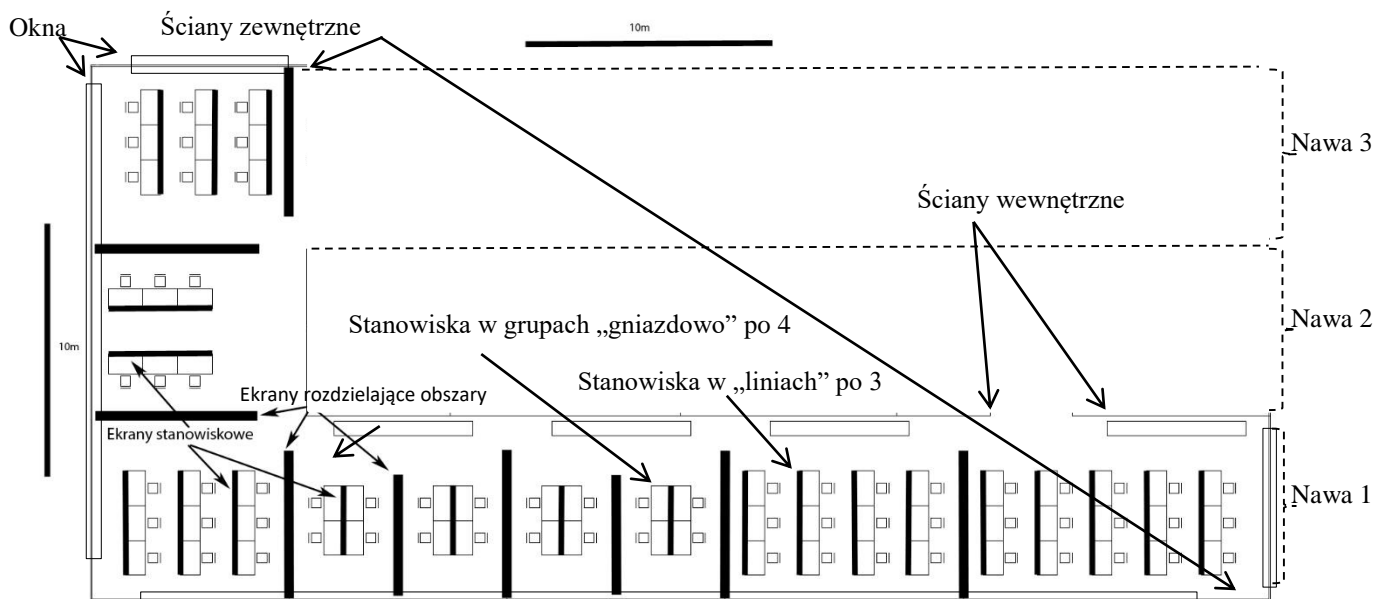
W celu uzyskania docelowej adaptacji akustycznej spełniającej wymagania właściwości akustycznych pomieszczenia (tabela 1.2-1), konieczne było przeprowadzenie optymalizacji elementów adaptacji akustycznej (pod względem ich liczby, usytuowania, wielkości oraz właściwości akustycznych). Wymagała ona wykonania badań metodą iteracyjnego uwzględnienia wpływu wielowariantowej adaptacji akustycznej. Badania przeprowadzono metodą obliczeniową, z wykorzystaniem narzędzia obliczeniowego w postaci komputerowego programu ODEON. W badaniach przyjęto tło akustyczne o poziomie dźwięku A 35 dB i o widmie przedstawionym na rys. 3.2-1.



Rys. 3.2-1. Poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach oktawowych „naturalnego” tła akustycznego o poziomie dźwięku A 35 dB (widmo tła wg ODEON)

3.3. Obiekt, w którym wykonano badania

Badanie właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia wielkoprzestrzennego przeprowadzono w pomieszczeniu trzynawowym o bardzo dużej kubaturze (rys. 3.3-1).



Rys. 3.3-1. Rzut rozpatrywanego pomieszczenia z ekranami akustycznymi dla ostatniego wariantu adaptacji akustycznej (wysokość ekranów: stanowiskowych 1,7 m, rozdzielających obszary 1,7–2,5 m oraz rozdzielających nawy 1,5 m; na rysunku pominięto stanowiska pracy w nawie 3, gdyż tego obszaru dalej się nie rozpatruje)

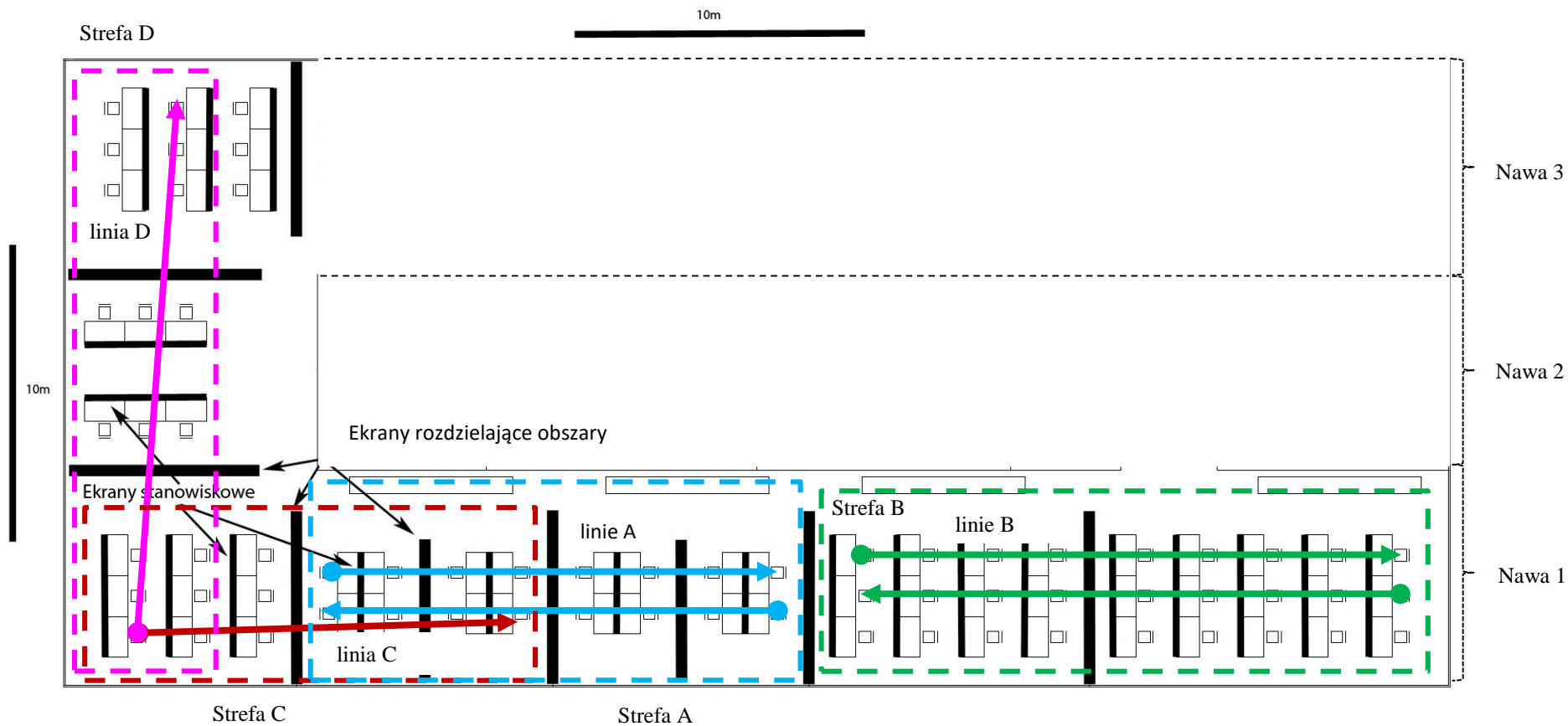
Kubatura pomieszczenia (obejmująca przestrzeń do pracy przy stołach oraz korytarze i ciągi piesze w nawach 1, 2 i 3, tj. obszar „open space” wnętrza ograniczony ścianami zewnętrznymi i wewnętrznymi) $V \approx 2750 \text{ m}^3$, pole powierzchni podłogi $S_p \approx 785 \text{ m}^2$, a wysokość pomieszczenia $H = 3,5 \text{ m}$. Ściany zewnętrzne pomieszczenia mają okna. W pomieszczeniu znajduje się 110 stanowisk pracy biurowej, każde wyposażone w drewniany stół roboczy i miękkie siedzisko z oparciem. Stanowiska pracy znajdują się w grupach usytuowanych „gniazdowo” po 4 lub w „liniach” po 3.

3.4. Zakres badań

W celu uzyskania docelowej adaptacji akustycznej, spełniającej wymagane właściwości akustyczne pomieszczenia wg PN EN ISO 3382-3:2012 i PN-B-02151-2:2018 uwzględniono warianty adaptacji akustycznej (widok pomieszczenia rys. 3.4-1):

0. Stan początkowy, bez uwzględnienia adaptacji akustycznej (tj. bez uwzględnienia: wykładziny dźwiękochłonnej na podłodze, dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, materiałów dźwiękochłonnych na ścianach pomieszczenia oraz ekranów akustycznych); podłoga, ściany i sufit pomieszczenia są otynkowane (ważony wskaźnik pochłaniania dźwięku $\alpha_w = 0,05$), okien $\alpha_w = 0,01(L)$, szafek i stołów drewnianych $\alpha_w = 0,1$, siedzisk miękkich $\alpha_w = 0,6$.
1. Jak w wariancie nr 0, z dodatkowym uwzględnieniem: wykładziny dźwiękochłonnej na podłodze ($\alpha_w = 0,25$) i dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, zawieszzonego na wysokości 3 m od podłogi ($\alpha_w = 0,95$).
2. Jak w wariancie nr 1, z dodatkowym uwzględnieniem materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia ($\alpha_w = 0,9$).
3. Jak w wariancie nr 2, z dodatkowym uwzględnieniem ekranów akustycznych tzw. stanowiskowych, tj. ekranów na stołach; górna krawędź ekranów na wysokości od podłogi 1,7 m ($\alpha_w = 0,9$).
4. Jak w wariancie nr 3, z dodatkowym uwzględnieniem tzw. ekranów rozdzielających obszary pomieszczenia (sektory); ekrany posadowione na podłodze mają różne wysokości – w zakresie 1,7–2,5 m ($\alpha_w = 0,9$).

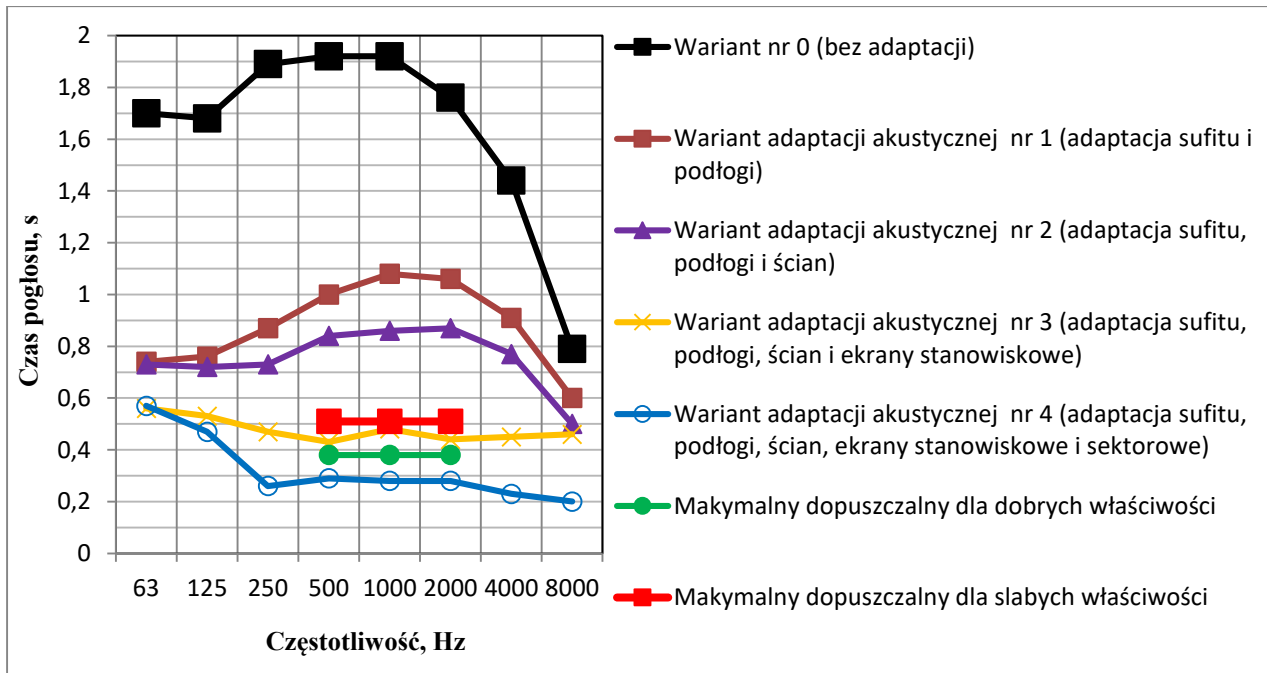
Zgodnie z metodą opisaną w rozdziale 1.3 (dla pomieszczeń o kubaturze powyżej 800 m³) pomieszczenie podzielono na jednorodne obszary/strefy reprezentatywne pod względem właściwości akustycznych dla całego pomieszczenia (rys. 3.4-1). Wyróżniono 4 strefy charakterystyczne dla całego pomieszczenia. Strefa A i B są strefami jednorodnymi, z tym, że w każdej z nich jest inna aranżacja stanowisk pracy. Strefa C jest niejednorodna, jednak ze względów szerzej opisanych w rozdziale 1.3, jest jedyną możliwą do wyznaczenia i oceny obszaru obejmującego 9 stanowisk pracy zlokalizowanych w nawie 1 po lewej stronie rys. 3.4-1. Strefa D jest również niejednorodna akustycznie, dodatkowo uwzględniono w niej propagację dźwięku wzdłuż ekranów stanowiskowych. Na tym rysunku naniesiono także linie obliczeniowe, na których wyznacza się wskaźnik transmisji mowy STI i poziom dźwięku A mowy od wzorcowego źródła mowy. W strefach A i B dane wyznaczano z dwóch linii obliczeniowych, a w strefach C i D z jednej linii obliczeniowej. Strefy A, B i C umożliwiają ocenienie wpływu różnych wariantów adaptacji akustycznej w typowych ustawieniach stanowisk pracy. Strefa D umożliwia ocenienie wpływu różnych wariantów adaptacji akustycznej w przypadku, gdy dźwięki rozmów rozprzestrzeniają się wzdłuż ekranów.



Rys. 3.4-1. Rzut rozpatrywanego pomieszczenia, z naniesionymi strefami (oznaczone liniami przerywanymi), w których określa się właściwości akustyczne. W strefach zaznaczono linie obliczeniowe (na których określa się wskaźnik transmisji mowy STI i poziom dźwięku A mowy). Punktem na linii zaznaczono położenie wzorcowego źródła mowy, a grotem strzałki oznaczono ostatni punkt obliczeniowy na linii

3.5. Wyniki badań

Na rys. 3.5-1 podano wyniki obliczeń czasu pogłosu w strefie C dla wszystkich wariantów adaptacji akustycznej.



Rys. 3.5-1. Czas pogłosu w strefie C rozpatrywanego pomieszczenia dla wszystkich wariantów adaptacji akustycznej (graniczne wartości: złe-słabe 0,51 s, słabe-dobre 0,38 s)

W tabeli 3.5-1 podano wyniki obliczeń dla wszystkich wariantów adaptacji akustycznej: spadku poziomu dźwięku A w funkcji odległości $D_{2,S}$ od wzorcowego źródła mowy, poziomu dźwięku A mowy w odległości 4 m $L_{p,A,S,4m}$ od wzorcowego źródła mowy i promienia rozproszenia r_D .

Tabela 3.5-1. Wyniki obliczeń trzech wielkości stosowanych do oceny średnich właściwości akustycznych biurowych pomieszczeń wieloprzestrzennych wg PN EN ISO 3382-3:2012 (kryteria zawarte w tabeli 1.2-1)

Nr wariantu adaptacji akustycznej	0	Strefa A			Strefa B			Strefa C			Strefa D		
		$D_{2,S}$, dB	$L_{p,A,S,4\text{ m}}$, dB	r_D , m	$D_{2,S}$, dB	$L_{p,A,S,4\text{ m}}$, dB	r_D , m	$D_{2,S}$, dB	$L_{p,A,S,4\text{ m}}$, dB	r_D , m	$D_{2,S}$, dB	$L_{p,A,S,4\text{ m}}$, dB	r_D , m
	1	1,7	55,3	9,5	1,8	55,7	11,4	2,0	54,7	8,5	1,1	55	14,6
	2	3,8	49,9	12,7	3,7	50,0	15,3	4,2	49,4	12,5	2,8	49,5	20,1
	3	4,9	48,6	12,6	4,5	48,6	14,8	4,7	49,2	13,3	3,4	49,1	18,4
	4	8,4	43,7	6,9	7,5	38,9	3,9	9,1	41,7	5,2	5,1	46,6	12,2
	4	10,9	40,2	4,9	9,1	38,6	3,7	11,9	39,4	4,2	11,1	39,9	4,7

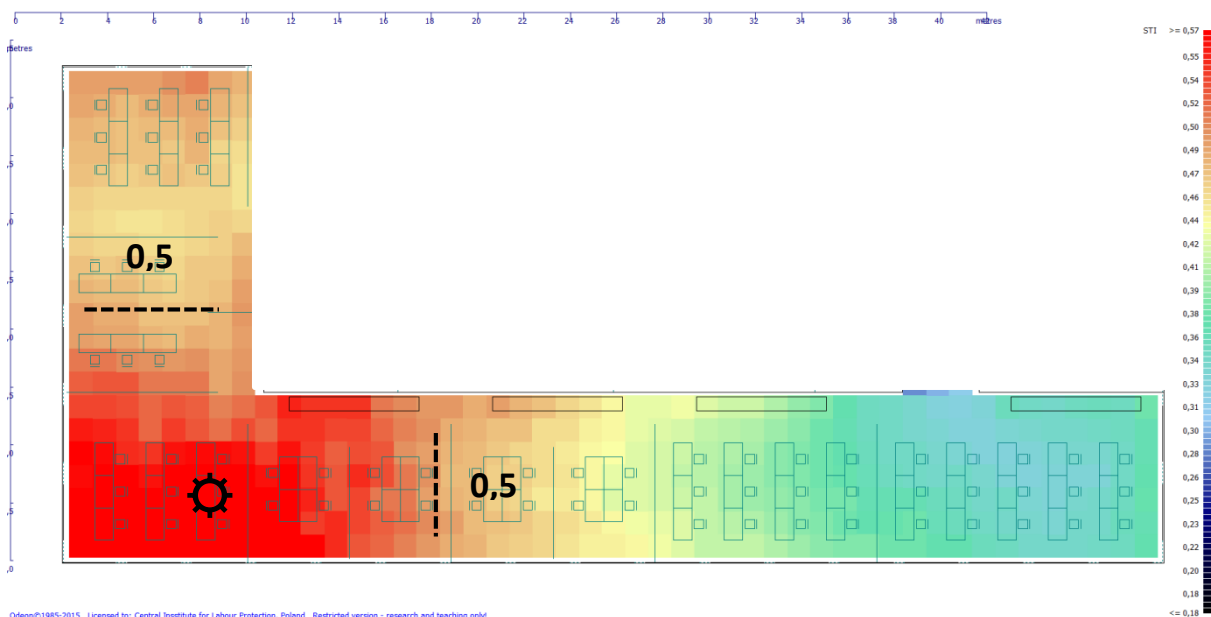
Oznaczenia :

$L_{p,A,S,4\text{ m}}$ – poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m od wzorcowego źródła mowy, w dB, (graniczne wartości: złe-słabe 50 dB, słabe-dobre 48 dB),

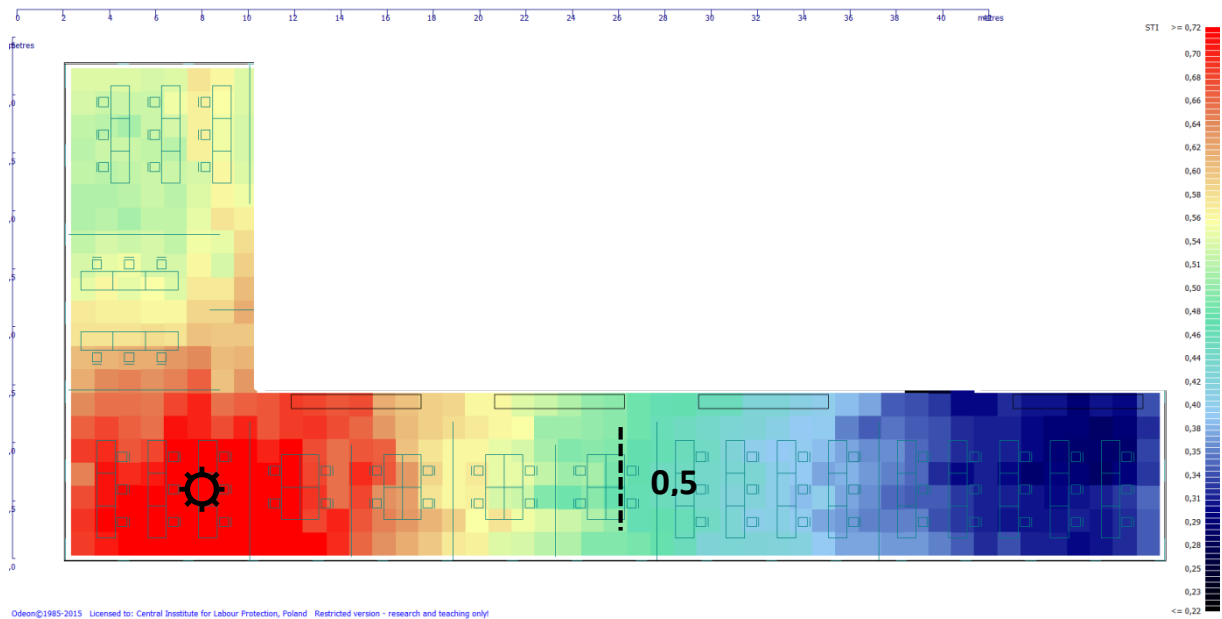
$D_{2,S}$ – spadek poziomu dźwięku A przy podwojeniu odległości od wzorcowego źródła mowy, w dB, (graniczne wartości: złe-słabe 5 dB, słabe-dobre 7 dB),

r_D – promień rozproszenia, w metrach (graniczne wartości: złe-słabe 10 m, słabe-dobre 5 m).

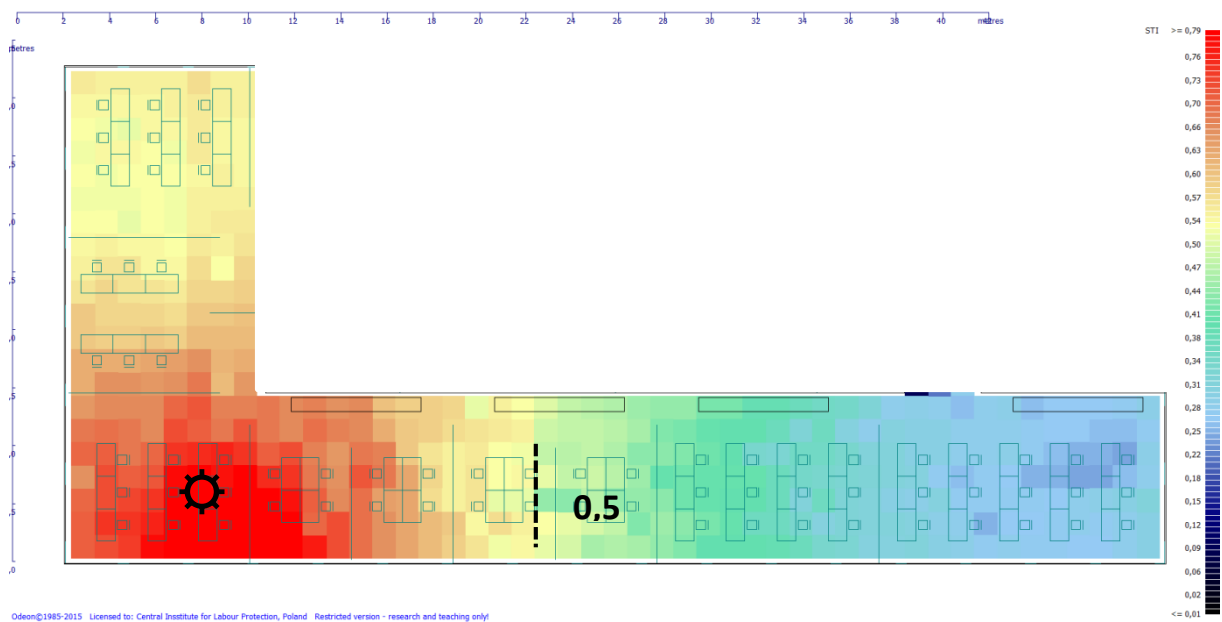
Rozkłady w przekroju poziomym pomieszczenia (na wysokości 1,2 m), wskaźnika transmisji mowy STI od wzorcowego źródła mowy, dla wszystkich wariantów adaptacji akustycznej (od 0 do 4) przedstawiono na rysunkach od 3.5-2 do 3.5-6.



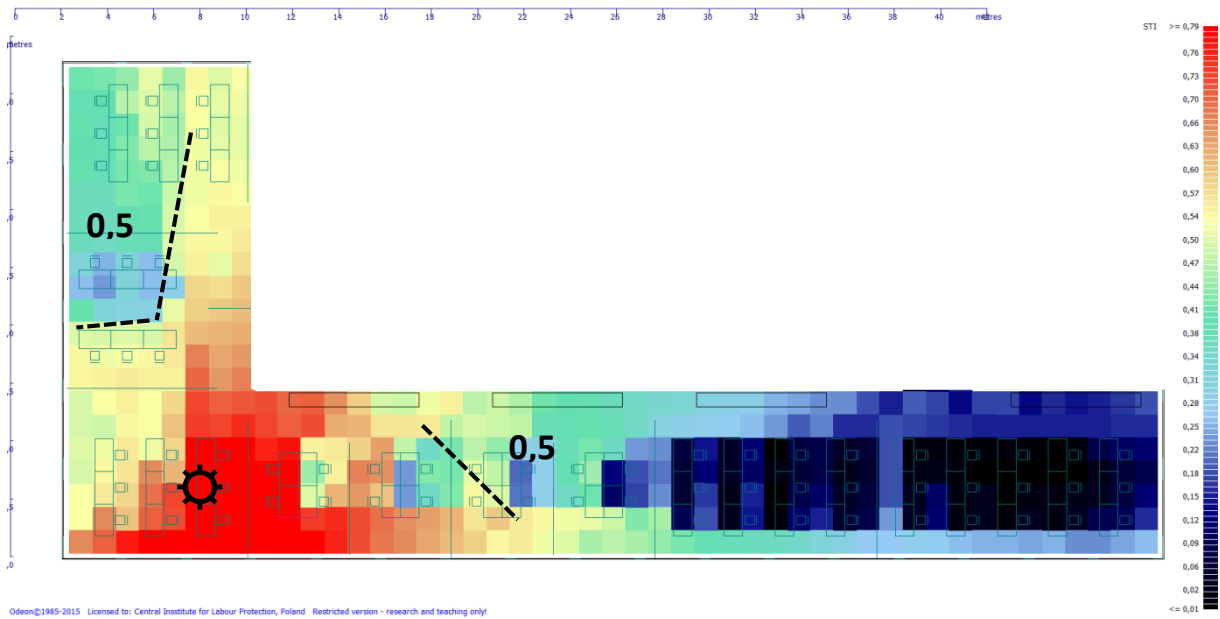
Rys. 3.5-2. Rozkład w pomieszczeniu wskaźnika transmisji mowy STI, dla wariantu adaptacji akustycznej 0 (bez adaptacji akustycznej)



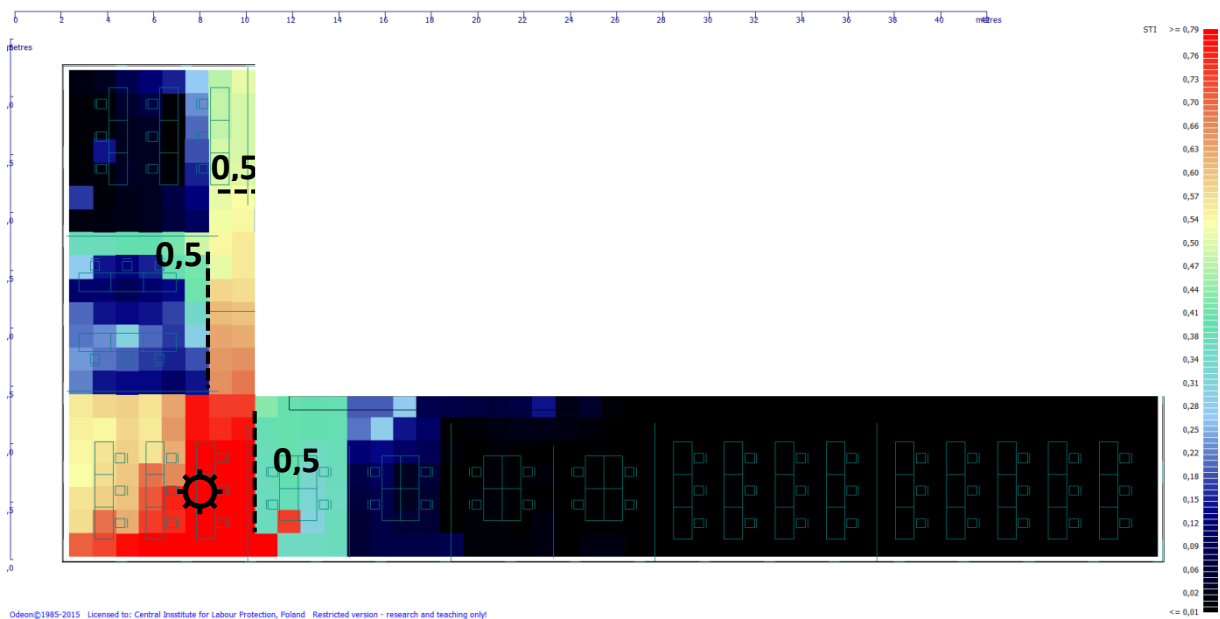
Rys. 3.5-3. Rozkład w pomieszczeniu wskaźnika transmisji mowy STI, dla wariantu adaptacji akustycznej 1 (z wykładziną dźwiękochłonną na podłodze i dźwiękochłonnym sufitem podwieszanym)



Rys. 3.5-4. Rozkład w pomieszczeniu wskaźnika transmisji mowy STI, dla wariantu adaptacji akustycznej 2 (z wykładziną dźwiękochłonną na podłodze i dźwiękochłonnym sufitem podwieszanym oraz materiałami dźwiękochłonnymi na wewnętrznych ścianach pomieszczenia)



Rys. 3.5-5. Rozkład w pomieszczeniu wskaźnika transmisji mowy STI, dla wariantu adaptacji akustycznej 3 (z wykładziną dźwiękochłonną na podłodze i dźwiękochłonnym sufitem podwieszanym, materiałami dźwiękochłonnymi na wewnętrznych ścianach pomieszczenia oraz ekranami stanowiskowymi)



Rys. 3.5-6. Rozkład w pomieszczeniu wskaźnika transmisji mowy STI, dla wariantu adaptacji akustycznej 4 (z wykładziną dźwiękochłonną na podłodze i dźwiękochłonnym sufitem podwieszanym, materiałami dźwiękochłonnymi na wewnętrznych ścianach pomieszczenia, ekranami stanowiskowymi i ekranami rozdzielającymi obszary)

3.6. Omówienie wyników

Wariant 0 adaptacji akustycznej

Przed wykonaniem adaptacji akustycznej: średni czas pogłosu pomieszczenia w zakresie częstotliwości 500–2000 Hz wynosił 1,87 s (wg kryteriów przedstawionych w tabeli 1.1-1 tzw. złe właściwości akustyczne pomieszczenia), spadek poziomu dźwięku A przy podwojeniu odległości $D_{2,5}$ od wzorcowego źródła mowy był zawarty w zakresie 1,1–2,0 dB (złe właściwości akustyczne pomieszczenia), poziom dźwięku A w odległości 4 m $L_{p,A,S,4\text{ m}}$ od wzorcowego źródła mowy był zawarty w zakresie 54,7–55,7 dB (złe właściwości akustyczne pomieszczenia) oraz promień rozproszenia r_D był zawarty w zakresie 8,5–14,6 m (złe właściwości akustyczne pomieszczenia). Wyniki te wskazują, że we wszystkich strefach pomieszczenia (A–D), właściwości akustyczne są skrajnie złe.

Wariant 1 adaptacji akustycznej

Po uwzględnieniu w pomieszczeniu wykładziny dywanowej ($\alpha_w = 0,25$) oraz dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego (o ważonym wskaźniku pochłaniania dźwięku $\alpha_w = 0,95$): średni czas pogłosu (w zakresie częstotliwości 500–2000 Hz) wynosił 1,1 s (złe właściwości akustyczne pomieszczenia), spadek poziomu dźwięku A przy podwojeniu odległości $D_{2,5}$ był zawarty w zakresie 2,8–4,2 dB (złe właściwości akustyczne pomieszczenia), poziom dźwięku A w odległości 4 m $L_{p,A,S,4\text{ m}}$ był zawarty w zakresie 49,4–50,0 dB (słabe właściwości akustyczne pomieszczenia) oraz promień rozproszenia r_D był zawarty w zakresie 12,5–20,1 m (złe właściwości akustyczne pomieszczenia). Wyniki te wskazują, że we wszystkich strefach właściwości akustyczne nadal są bardzo złe.

Wariant 2 adaptacji akustycznej

Po uwzględnieniu w pomieszczeniu wykładziny dywanowej, dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego oraz materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach o ważonym wskaźniku pochłaniania dźwięku materiału $\alpha_w = 0,9$: średni czas pogłosu (w zakresie częstotliwości 500–2000 Hz) wynosił 0,86 s (złe właściwości akustyczne pomieszczenia), spadek poziomu dźwięku A przy podwojeniu odległości $D_{2,5}$ był zawarty w zakresie 3,4–4,9 dB (złe właściwości akustyczne pomieszczenia), poziom dźwięku A w odległości 4 m $L_{p,A,S,4\text{ m}}$ był zawarty w zakresie 48,6–49,2 dB (słabe właściwości akustyczne pomieszczenia) oraz promień rozproszenia r_D był zawarty w zakresie 12,6–18,4 m (złe

właściwości akustyczne pomieszczenia). Wyniki te wskazują, że we wszystkich strefach właściwości akustyczne w istotny sposób się poprawiły, jednak nadal są złe.

Wariant 3 adaptacji akustycznej

Po uwzględnieniu w pomieszczeniu wykładziny dywanowej, dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia oraz ekranów stanowiskowych o wysokości od podłogi 1,7 m i ważonym wskaźniku pochłaniania dźwięku powierzchni ekranów $\alpha_w = 0,9$: średni czas pogłosu (w zakresie częstotliwości 500–2000 Hz) wynosił 0,45 s (słabe właściwości akustyczne pomieszczenia), spadek poziomu dźwięku A przy podwojeniu odległości $D_{2,s}$ był zawarty w zakresie 5,1–9,1 dB (średnio 7,5 dB – dobre właściwości akustyczne pomieszczenia, w szczególności w strefach A, B i C był większy od 7 dB – dobre właściwości akustyczne pomieszczenia, natomiast w strefie D wynosił 5,1 dB – słabe właściwości akustyczne pomieszczenia), poziom dźwięku A w odległości 4 m $L_{p,A,S,4 m}$ był zawarty w zakresie 38,9–46,6 dB (dobre właściwości akustyczne pomieszczenia) oraz promień rozproszenia r_D był zawarty w zakresie 3,9–12,2 m (w strefie B – dobre właściwości, w strefach A i C – słabe właściwości, w strefie D – złe właściwości akustyczne pomieszczenia). Wyniki te wskazują, że w strefie B wartość wszystkich wielkości kryterialnych spełniała kryterium dobrych właściwości, w strefach A i C są słabe właściwości, w strefie D są złe właściwości akustyczne pomieszczenia. Istotny jest fakt, że dla tego przypadku czas pogłosu spełnia kryterium słabych właściwości (tj. spełnione jest kryterium obowiązujące w Polsce wg PN-B-02151-4:2015). Wynika z tego, że właściwości akustyczne pomieszczenia po uwzględnieniu wykładziny dywanowej, dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia oraz ekranów stanowiskowych są słabe. Jednocześnie można stwierdzić, że gdyby stanowiska pracy były rozmieszczone jak w strefie B, to taka adaptacja akustyczna pomieszczenia spełniałaby kryterium dobrych właściwości akustycznych.

Wariant 4 adaptacji akustycznej

Po uwzględnieniu w pomieszczeniu wykładziny dywanowej, dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia, ekranów stanowiskowych oraz ekranów rozdzielających różne obszary pomieszczenia ($h = 1,7\text{--}2,5$ m; $\alpha_w = 0,9$):

średni czas pogłosu (w zakresie częstotliwości 500–2000 Hz) wynosił 0,28 s (dobre właściwości akustyczne pomieszczenia), spadek poziomu dźwięku A przy podwojeniu odległości $D_{2,S}$ był zawarty w zakresie 9,1–11,9 dB (dobre właściwości akustyczne pomieszczenia), poziom dźwięku A w odległości 4 m $L_{p,A,S,4 m}$ był zawarty w zakresie 38,6–39,9 dB (dobre właściwości akustyczne pomieszczenia) oraz promień rozproszenia r_D był zawarty w zakresie 3,7–4,9 m (dobre właściwości akustyczne pomieszczenia). Wyniki te wskazują, że we wszystkich strefach pomieszczenia (A, B, C i D) wartość wszystkich wielkości kryterialnych spełniała kryterium dobrych właściwości akustycznych. Wynika z tego, że właściwości akustyczne pomieszczenia – po uwzględnieniu wykładziny dywanowej, dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, materiałów dźwiękochłonnych na wewnętrznych ścianach pomieszczenia, ekranów stanowiskowych oraz ekranów rozdzielających różne obszary pomieszczenia – są dobre wg kryteriów PN EN ISO 3382-3:2012, a także spełniają kryterium wg PN-B-02151-4:2015.

3.7. Podsumowanie wyników badań adaptacji akustycznej pomieszczenia

Przedstawione wyniki badań ilustrują proces projektowania adaptacji akustycznej w biurowym pomieszczeniu wieloprzestrzennym, z wykorzystaniem programu obliczeniowego. Badania przeprowadzono w typowym trzynawowym biurowym pomieszczeniu wieloprzestrzennym o kubaturze 2750 m³ (rys. 3.3-1). Przy tak dużej kubaturze oraz niejednorodnej aranżacji wnętrza i stanowisk pracy, właściwości akustyczne wewnątrz całego pomieszczenia były zróżnicowane, dlatego rozpatrywano je niezależnie w 4 reprezentatywnych obszarach (strefach). Ocena całego pomieszczenia wynikała z ocen w tych obszarach.

W pomieszczeniu uwzględniono 4 warianty adaptacji akustycznej (oraz stan przed adaptacją oznaczony nr 0). Właściwości akustyczne pomieszczenia, z uwzględnieniem czwartego wariantu adaptacji akustycznej, spełniają wszystkie wymagania wg PN EN ISO 3382-3:2012 i PN-B-02151-4:2015. W tym wariantcie uwzględniono: wykładzinę dźwiękochłonną na podłodze (wskaźnik pochłaniania dźwięku $\alpha_w = 0,25$), dźwiękochłonny sufit podwieszany (zawieszony na wysokości 3 m od podłogi ($\alpha_w = 0,95$), materiały dźwiękochłonne na wewnętrznych ścianach pomieszczenia ($\alpha_w = 0,9$), ekrany akustyczne przy stanowiskach pracy $h = 1,7$ m; $\alpha_w = 0,9$) oraz ekrany rozdzielające różne obszary pomieszczenia ($h = 1,7$ – $2,5$ m; $\alpha_w = 0,9$).

4. Podsumowanie

W celu uzyskania wymaganych właściwości środowiska akustycznego w biurowym pomieszczeniu wieloprzestrzennym konieczne jest zastosowanie adaptacji akustycznej obejmującej: dźwiękochłonny sufit podwieszany, dźwiękochłonną wykładzinę podłogową, dźwiękochłonne materiały/wyroby na ścianach pomieszczenia, ekrany akustyczne przy stanowiskach pracy oraz ekrany akustyczne oddzielające grupy stanowisk pracy.

Dźwiękochłonne sufity podwieszane oraz wykładzina dźwiękochłonna na podłodze są elementami, które w największym stopniu wpływają na właściwości akustyczne pomieszczenia, jednak ich zastosowanie nie jest wystarczające do uzyskania spełnienia kryteriów podanych w PN EN ISO 3382-3:2012 i PN-B-02151-4:2015. Ponieważ w biurowych pomieszczeniach wieloprzestrzennych czas pogłosu powinien być bardzo krótki, dlatego konieczne jest zastosowanie w dźwiękochłonym suficie podwieszanym materiałów dźwiękochłonnych o bardzo dużym współczynniku pochłaniania dźwięku (ważony wskaźnik pochłaniania dźwięku $\alpha_w \geq 0,9$).

W celu uzyskania tzw. dobrych właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia wieloprzestrzennego (wg PN EN ISO 3382-3:2012), niezbędne jest także zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych na ścianach pomieszczenia. Spełnienie wymagania aby dźwięki mowy były w rozpatrywanym pomieszczeniu słabo słyszalne oraz były mało zrozumiałe, wymusza zapewnienie w nich dużych strat energii dźwięków mowy w funkcji odległości. Wymaga to zastosowania w pomieszczeniu ekranów akustycznych, umieszczonych przy źródłach mowy, tj. jak najbliżej stanowisk pracy. Ekran te, aby były skuteczne akustycznie muszą być wyższe niż osoba siedząca, tj. muszą mieć wysokość ok. 1,5–1,7 m.

Oceniając właściwości akustyczne pomieszczenia o kubaturze powyżej 800 m³ należy podzielić je (ekranami akustycznymi) na obszary (strefy) o wymiarze liniowym nieprzekraczającym ok. 22 m. Ekran te muszą stać na podłodze i mieć wysokość w zakresie 1,7–2,5 m.

W pomieszczeniach w których poziom dźwięku A tła akustycznego jest bardzo mały (ok. 25–30 dB), to w celu uzyskania spełnienia wymagań wg PN EN ISO 3382-3:2012 (w szczególności uzyskanie wartości promienia rozproszenia poniżej 5 m) konieczne jest zastosowanie dźwięków maskujących. Najbardziej skutecznym dźwiękiem maskującym zrozumiałość niepożądanych rozmów w biurowym pomieszczeniu wieloprzestrzennym jest dźwięk o widmie częstotliwości szumu

różowego (w zakresie częstotliwości obejmującym oktafowe pasma częstotliwości z zakresu 63–8000 Hz). Mniej skutecznym sposobem jest zastosowanie jako dźwięków maskujących szumu korygowanego częstotliwościowo, zgodnie z charakterem widma naturalnego tła akustycznego (niskoczęstotliwościowe) lub widma mowy. Dla tego pierwszego charakteru widma częstotliwości wystarczającym do uzyskania dobrych właściwości akustycznych pomieszczenia jest zastosowanie dźwięku maskującego o poziomie dźwięku A 30 dB (tj. o ok. 7 dB mniejszym niż dopuszczalny poziom tła akustycznego w pomieszczeniu wg PN-B-02151-2:2018).

5. Wnioski

- W biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych możliwe jest uzyskanie wymaganych przepisami (PN-B-02151-4:2015) i zaleceniami (PN EN ISO 3382-3:2012) właściwości akustycznych. Do uzyskania takich właściwości konieczne jest zastosowanie wielu elementów adaptacji akustycznej (dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, dźwiękochłonnej wykładziny podłogowej, zastosowanie dźwiękochłonnych materiałów/wyrobów na ścianach pomieszczenia, ekranów akustycznych przy stanowiskach pracy, ekranów oddzielających grupy stanowisk pracy), a także zastosowanie maskowania dźwięków mowy.
- W celu uzyskania w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych spełnienia wymagań wg PN EN ISO 3382-3:2012 (w szczególności uzyskania wartości promienia rozproszenia poniżej 5 m), w których poziom dźwięku A tła akustycznego jest mniejszy od 30 dB, konieczne jest zastosowanie dźwięków maskujących dźwięki mowy.
- Najbardziej skutecznymi dźwiękami maskującymi dźwięki mowy są dźwięki o widmie szumu różowego (w zakresie częstotliwości obejmującym oktafowe pasma częstotliwości z zakresu 63–8000 Hz). Mniej skutecznym sposobem jest zastosowanie, jako dźwięków maskujących, szumu korygowanego częstotliwościowo zgodnie z charakterem widma naturalnego tła akustycznego.
- Niezbędny poziom dźwięku A dźwięków maskujących umożliwiających uzyskanie odpowiednich właściwości akustycznych pomieszczenia obowiązujących wg. przepisów i zaleceń (PN-B-02151-2:2018 i wg PN EN ISO 3382-3:2012) wynosi ok. 30–35 dB. Dźwięk maskujący o tym poziomie nie spowoduje przekroczenia poziomów dopuszczanych hałasu w pomieszczeniu

(PN-B-02151-2:2018) oraz na stanowiskach pracy (Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dn. 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy oraz norma PN-N-01307:1994).