

# ZMNIĘSIENIE UCIAŹLIWOŚCI HAŁASU W BIUROWYCH POMIESZCZENIACH OPEN SPACE PRZEZ MASKOWANIE DŹWIĘKÓW NIEPOŻĄDANYCH KOLUMNAMI DŹWIĘKOWYMI W KSZTAŁCIE PIRAMID

REDUCING NOISE NUISANCE IN OPEN-PLAN OFFICE ROOMS  
BY MASKING UNWANTED SOUNDS  
WITH PYRAMID-SHAPED SOUND COLUMNS

Witold Mikulski

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy / Central Institute For Labour Protection – National Research Institute,  
Warsaw, Poland  
Zakład Zagrożeń Wibroakustycznych / Department of Vibroacoustic Hazards

## STRESZCZENIE

**Wstęp:** W celu uzyskania odpowiednich akustycznych warunków środowiska pracy w wielkoprzestrzennych pomieszczeniach biurowych *open space* konieczna jest ich dość duża adaptacja akustyczna, m.in. umożliwiająca ograniczenie czasu pogłosu do ok. 0,2–0,4 s. Jeśli w tych pomieszczeniach tło akustyczne cechuje się bardzo niskimi poziomami dźwięku A (<30 dB), to sama adaptacja akustyczna może być niewystarczająca. W takich przypadkach konieczne może być zastosowanie systemu generującego dźwięki i wytwarzającego „sztucznie” tło akustyczne. System taki nazwa się systemem maskowania dźwięku. Ważne jest, że musi on zapewniać maskowanie dźwięku na wszystkich stanowiskach pracy, których w tych pomieszczeniach bywa bardzo dużo. Dlatego systemy maskujące zawierają wiele źródeł-głośników maskujących, które są równomiernie rozmieszczone w pomieszczeniu, najczęściej w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym. **Materiał i metody:** W artykule rozpatrzono możliwość zmniejszenia liczby źródeł maskujących przez zastosowanie kilku 4-głośnikowych kolumn dźwiękowych. Zastosowano w nich głośniki o znacznie mniejszych gabarytach i mniejszej mocy. Kształt kolumny dźwiękowej i rozmieszczenie w niej głośników powodują jej taką charakterystykę kierunkową promieniowania, która umożliwia uzyskanie bardziej równomiernego nagłośnienia pomieszczenia dźwiękiem maskującym. W artykule podano kryterium uzyskania równomiernego nagłośnienia dźwiękiem maskującym wielkoprzestrzennych pomieszczeń biurowych *open space*. Kryteria te odnoszą się do uzyskania w obszarze pracy odpowiednich parametrów dźwięku maskującego i są oparte na kryterialnej wartości promienia rozproszenia. **Wyniki:** W artykule podano wyniki badań pomiarowych równomierności nagłośnienia w rozpatrywanym pomieszczeniu za pomocą ww. kolumn dźwiękowych emitujących dźwięk maskujący. **Wnioski:** Możliwe jest ograniczenie liczby źródeł dźwięku maskującego w rozpatrywanych pomieszczeniach, gdy w miejsce od kilkunastu do kilkudziesięciu głośników zastosuje się 4 kolumny dźwiękowe w kształcie piramid. Med. Pr. 2022;73(3):229–240

**Słowa kluczowe:** adaptacja akustyczna, pomieszczenia biurowe *open space*, zrozumiałość mowy, promień rozproszenia, STI, system maskowania dźwięków

## ABSTRACT

**Background:** In order to obtain appropriate, acoustic conditions of working environment in open plan offices, it is necessary to apply quite a large acoustic treatment in these rooms (e.g., to achieve reverberation time 0.2–0.4 s). However, in cases where the background noise levels in rooms are very low (A-weighted sound pressure level <30 dB), then acoustic treatment alone may be insufficient. In such cases, it may be necessary to use a sound system that generate an “artificial” background noise (sound masking system). It is important that the sound masking system must mask the sound in many workplaces. Therefore, sound masking systems contain a large number of sound sources (loudspeakers), evenly distributed throughout the room. Most often, these loudspeakers are placed in a sound-absorbing suspended ceiling. **Material and Methods:** The article considers the possibility of reducing the number of sound masking sources by using 4-loudspeakers columns. These columns use speakers with much smaller dimensions and less power. The shape of the columns and the arrangement of the loudspeakers in the columns result in a directional radiation pattern that allows for a more even distribution of the masking sound in a room. The article provides the criterion of obtaining a uniform masking sound in the open plan offices. These criteria relate to obtaining appropriate masking sound parameters in the working area, and are based on the criterion value of the distraction distance of the room. **Results:** The article provides the results of measurement tests of the uniformity of masking sound in the room with the use of the above-mentioned sound masking columns.

Finansowanie / Funding: opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej (zadanie nr 2.SP.05 pt. „Opracowanie źródła dźwięku maskującego hałas związany z komunikacją werbalną w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych”, kierownik zadania: dr hab. inż. Witold Mikulski, prof. CIOP-PIB). Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

**Conclusions:** It is possible to limit the number of standard masking sound sources in the rooms under consideration using pyramid-shaped sound columns with 4 loudspeakers are used. Med Pr. 2022;73(3):229–40

**Key words:** acoustic treatment, open-plan office rooms, speech intelligibility, distraction distance, STI, sound masking system

Autor do korespondencji / Corresponding author: Witold Mikulski, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Zagrożeń Wibroakustycznych, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, e-mail: wimik@ciop.pl  
Nadesłano: 13 stycznia 2022, zatwierdzono: 28 kwietnia 2022

## WSTĘP

Stanowiska pracy w biurach dość powszechnie organizuje się w dużych pomieszczeniach zwanych biurowymi pomieszczeniami wielkoprzestrzennymi lub biurowymi pomieszczeniami *open space*. Ze względu na ograniczenia konstrukcyjne budynków pomieszczenia te są długie (10–40 m) oraz cechują się dużo mniejszą szerokością (8–12 m) i najmniejszą wysokością (3–3,5 m). Pod względem rozchodzenia się w nich dźwięku są to pomieszczenia długie i niskie, których właściwości akustyczne (poza wyposażeniem, w tym ekranami akustycznymi) zależą głównie od właściwości akustycznych sufitu i podłogi.

Głównymi źródłami dźwięków przeszkadzających pracownikom w pracy w tych pomieszczeniach są rozmowy innych osób. Podstawową przyczyną uciążliwości dźwięków mowy w tych pomieszczeniach są nie ich duże poziomy dźwięku A (<55 dB) [1,2]), ale to, że ich treść jest wyraźnie zrozumiała, co dekoncentruje pracowników. Sposobem na ograniczenie percepcji dźwięków mowy jest ich maskowanie dźwiękami, które są neutralne dla słuchającego (ponieważ nie niosą informacji, tak jak np. szum [3–7]). W celu skutecznego maskowania dźwięków mowy dźwięki maskujące muszą cechować się dostatecznie dużymi poziomami i odpowiednimi widmami częstotliwości. Zapewnienie maskowania dźwiękami na wszystkich stanowiskach pracy wymaga równomiernego nagłośnienia dźwiękami maskującymi całego pomieszczenia. W tym celu należy zastosować dużą liczbę źródeł-głośników maskujących, które w większości zastosowań umieszcza się w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym.

Duża liczba źródeł maskujących wymaga rozbudowanej instalacji systemu maskującego, co zwiększa koszt instalacji i zmniejsza właściwości dźwiękochłonne sufitu. W części „Materiał i metody” niniejszego artykułu podano rezultaty obliczeń zależności równomierności nagłośnienia dźwiękiem maskującym rozpatrywanego

pomieszczenia biurowego o kubaturze 210 m<sup>3</sup> od liczby źródeł-głośników emitujących dźwięki maskujące. Wynika z nich, że dla uzyskania równomiernego nagłośnienia rozpatrywanego pomieszczenia konieczne jest zastosowanie 8–9 źródeł-głośników maskujących.

W publikacji autora niniejszego artykułu [8] zaproponowano zastąpienie dużej liczby źródeł-głośników maskujących kilkoma specjalnymi kolumnami dźwiękowymi w kształcie piramid zawieszonych wierzchołkiem do dołu. Źródła dźwięku o takim kształcie powodują mniejszą niż w przypadku pojedynczych głośników kierunkowość emisji dźwięku bezpośrednio pod kolumną dźwiękową, co skutkuje większą równomiernością nagłośnienia pomieszczenia dźwiękiem maskującym [8,9]. Umożliwia to więc uzyskanie skutecznego maskowania przy znacznie mniejszej liczbie źródeł maskujących i ograniczeniu maksymalnego poziomu dźwięku maskującego. W badaniach obliczeniowych [8,9] wykazano możliwość nagłośnienia dźwiękiem maskującym pomieszczenia za pomocą 4 kolumn dźwiękowych wyposażonych w 4 głośniki o średnicy ok. 50 mm i mocy elektrycznej (znamionowej) do 5 W.

Celami pracy były określenie kryterium uzyskania efektywnego maskowania dźwięków niepożądanych (w szczególności równomiernego nagłośnienia dźwiękiem maskującym) wielkoprzestrzennych pomieszczeń biurowych *open space* i weryfikacja pomiarowa skuteczności systemu maskującego zawierającego 4 kolumny dźwiękowe w kształcie piramid.

W artykule w części wstępnej przedstawiono podsumowanie wcześniejszych badań obliczeniowych autora dotyczących: określenia kryterium oceny skuteczności uzyskania w pomieszczeniu efektywnego maskowania dźwięku, wyboru efektywnego widma i poziomu dźwięku A dźwięku maskującego, określenia wpływu liczby źródeł maskujących na równomierność nagłośnienia pomieszczenia dźwiękiem maskującym oraz uwzględnienia źródła dźwięku maskującego w postaci kolumny dźwiękowej w kształcie piramidy. W części zasadniczej

podano wyniki badań pomiarowych równomierności nagłośnienia (dźwiękiem maskującym) pomieszczenia biurowego, jak w publikacji autora [9], lecz w rozpatrywanym przypadku o innej aranżacji akustycznej (tj. bez stanowiskowych ekranów akustycznych) w warunkach *in situ* za pomocą opracowanych kolumn dźwiękowych w kształcie piramid.

### Kryteria oceny skutecznego zastosowania dźwięku maskującego w wielkoprzestrzennych pomieszczeniach biurowych *open space*

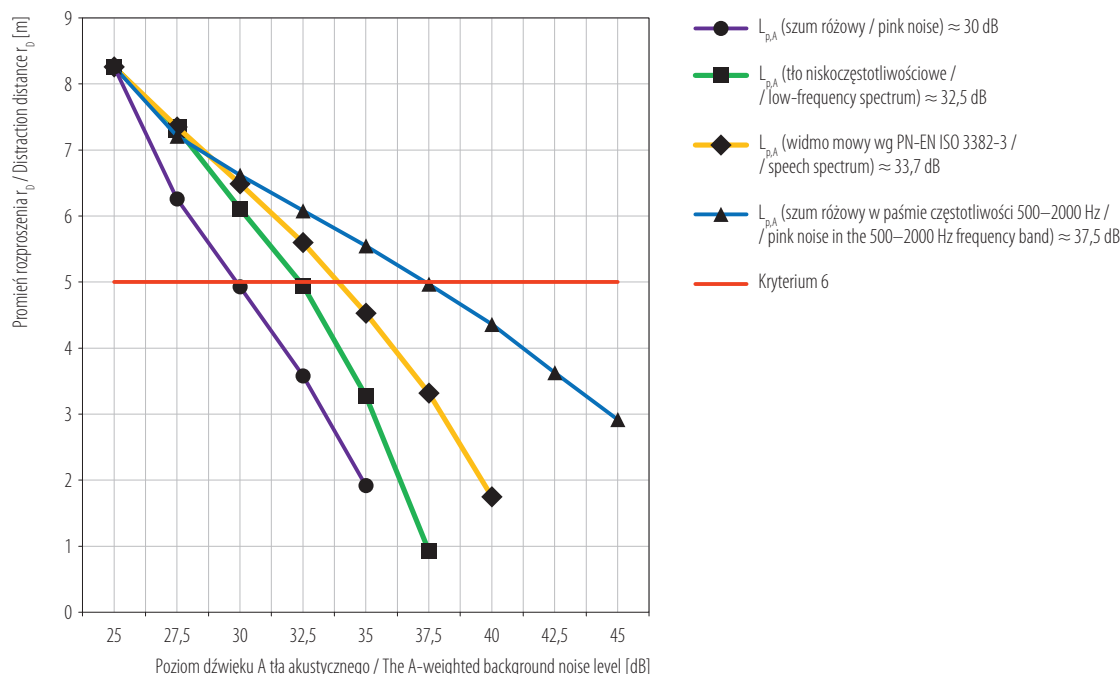
Dotychczas stosowane kryteria oceny akustycznej środowiska akustycznego w wielkoprzestrzennych pomieszczeniach biurowych *open space*:

- Kryterium 1: Równoważny poziom dźwięku A na stanowisku pracy (od wszystkich źródeł hałasu łącznie), ze względu na możliwość realizacji podstawowych zadań pracy (wg PN-N-01307 [1]):  $L_{p,A,eq,Te} \leq 55$  dB.
- Kryterium 2: Równoważny poziom dźwięku A tła akustycznego w pomieszczeniu (wg PN-B-02151-2 [10]):  $L_{p,A,eq} \leq L_{p,A,eq,nT} + 10 \times \log(T_{mf}/T_0) = 40 + 10 \times \log(0,40/0,438) = 40 - 0,39 \approx 39,6$  dB, gdzie:  $L_{p,A,eq,nT}$  – wzorcowy maksymalny (najwyższy dopuszczalny) poziom dźwięku A (wg PN-B-02151-2 [10] dla „biur wielkoprzestrzennych oraz pokoi biurowych typu *open space*” wynosi 40 dB) [dB];  $T_{mf}$  – średni z oktaowych pasm częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz czas pogłosu pomieszczenia [s]; dla pomieszczenia, w którym przeprowadzono pomiary ~0,4 s (dla częstotliwości 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz, odpowiednio, 0,37 s, 0,41 s i 0,43 s) [s];  $T_0$  – dopuszczalny czas pogłosu pomieszczenia (dla pomieszczenia, w którym przeprowadzono pomiary, zamieszczony w części zasadniczej artykułu, określony ze wzoru 3b) [s].
- Kryterium 3a: Chłonność akustyczna pomieszczenia w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz (dla pola powierzchni rzutu pomieszczenia, w którym przeprowadzono pomiary, rozpatrywanego w części zasadniczej artykułu,  $S_p = 70$  m<sup>2</sup>) (wg PN-B-02151-4 [11]):  $A_{500Hz}, A_{1000Hz}, A_{2000Hz} \geq 1,1 \times S_p = 77$  m<sup>2</sup> lub zamiennie (szacunkowo):
- Kryterium 3b: Czas pogłosu pomieszczenia w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz (obliczony z chłonności akustycznych pomieszczenia):  $T_{500Hz}, T_{1000Hz}, T_{2000Hz} \leq ((0,161 \times V)/(1,1 \times S_p)) = 0,146 \times H = 0,438$  s, gdzie: V – kubatura pomieszczenia (wszystkie obliczone wartości zależą od rozpatrywanego pomieszczenia, kubaturę obliczono dla pomieszczenia, w którym przeprowadzono pomiary zamieszczone w części zasadniczej artykułu tj.  $V = 210$  m<sup>3</sup>) [m<sup>3</sup>];  $S_p$  – pole powierzchni rzutu pomieszczenia (podłogi; dla pomieszczenia, w którym przeprowadzono pomiary, 70 m<sup>2</sup>) [m<sup>2</sup>]; H – wysokość pomieszczenia (dla pomieszczenia, w którym przeprowadzono pomiary, 3 m) [m].
- Kryterium 4: Poziom dźwięku A w odległości 4 m od wzorcowego źródła mowy (wg PN-EN ISO 3382-3 [12]):  $L_{p,A,S,4m} \leq 48$  dB.
- Kryterium 5: Spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości od wzorcowego źródła mowy (wg PN-EN ISO 3382-3 [12]):  $D_{2,S} = L_{p,A,S,1m} - L_{p,A,S,2m} \geq 7$  dB.
- Kryterium 6: Promień rozproszenia  $r_D$  [odległość od wzorcowego źródła mowy, w której wartość wskaźnika transmisji mowy (*speech transmission index* – STI) wynosi 0,5) (wg PN-EN ISO 3382-3 [12]):  $r_D \leq 5$  m.
- Kryterium 7: Promień prywatności  $r_p$  (odległość od wzorcowego źródła mowy, w której STI = 0,2):  $r_p \approx 2,1 \times r_D$ , gdzie liczba 2,1 została oszacowana przez autora w ramach wcześniej opublikowanych badań [13,14].

Zastosowanie elementów adaptacji akustycznej pomieszczenia (np. dźwiękochłonnego sufitu, ekranów akustycznych itp.) umożliwia spełnienie kryteriów 1–5 [13,15–21], ale nie umożliwia spełnienia kryteriów 6–7 dotyczących ograniczenia zrozumiałości mowy (określanego wielkościami promień rozproszenia  $r_D$  i promień prywatności  $r_p$ ), które zależą także od poziomu i charakteru widma tła akustycznego. Dlatego w większości przypadków konieczne jest zastosowanie dźwięków maskujących.

W celu uzyskania skutecznego maskowania dźwięków mowy w wielkoprzestrzennych pomieszczeniach biurowych *open space* konieczne jest zastosowanie dźwięku o odpowiednio dużym poziomie dźwięku A i odpowiednim widmie częstotliwościowym, a także zapewnienie odpowiedniej równomierności nagłośnienia dźwiękiem maskującym w pomieszczeniach (tj. na wszystkich stanowiskach pracy).

Dźwięk maskujący musi zapewniać skuteczne maskowanie, a jednocześnie nie może istotnie zwiększać hałasu na stanowiskach pracy [3,5,6]. To pierwsze implikuje zastosowanie dźwięku o odpowiedniej charakterystyce częstotliwościowej i odpowiednio dużym poziomie. To drugie określa natomiast maksymalny poziom dźwięku maskującego, ograniczony poziomem dopuszczalnym hałasu na rozpatrywanych stanowiskach pracy.



**Rycina 1.** Promień rozproszenia  $r_D$  dla dźwięku maskującego o charakterystyce częstotliwości: szumu różowego, szumu różowego w paśmie częstotliwości 500–2000 Hz, widmie mowy i widmie niskoczęstotliwościowym (o poziomach dźwięku A  $L_{p,A}$  z zakresu 25–45 dB) [24]  
**Figure 1.** The distraction distance  $r_D$  for masking sound with the frequency characteristics: pink noise, pink noise in the 500–2000 Hz frequency band, speech spectrum and low-frequency spectrum (with A-sound pressure levels  $L_{p,A}$  in the range of 25–45 dB) [24]

W niniejszym artykule przyjęto, że pierwsze można określić poprzez podane wyżej kryterium 6 (zależność 6), tj. w postaci określenia minimalnego poziomu dźwięku A, przy którym wartość promienia rozproszenia  $r_D$  spełni kryterium (tzn.  $r_D \leq 5$  dB).

We wcześniejszych badaniach autora [22,23], których syntetyczne wyniki przedstawiono na rycinie 1, określono zależność promienia rozproszenia  $r_D$  od poziomu dźwięku A i charakterystyki częstotliwościowej dźwięku maskującego. Wynika z niej, że stosując dźwięk maskujący o widmie szumu różowego i poziomie dźwięku A  $>30$  dB, uzyskuje się wartość promienia rozproszenia mniejszą niż kryterialna (tj.  $r_D \leq 5$  m). Znaczący to, że dźwięk maskujący o poziomie dźwięku A  $\geq 30$  dB o widmie szumu różowego zapewnia efektywne maskowanie dźwięku w rozpatrywanym tam pomieszczeniu [22,23]. Maksymalny poziom dźwięku A dźwięku maskującego w rozpatrywanym tam pomieszczeniu nie powinien przekroczyć poziomu dopuszczalnego określonego w kryterium 2 (wzór 2).

Dla wcześniej rozpatrywanego pomieszczenia [23], tj. o średnim czasie pogłosu pomieszczenia  $T_{mf} = 0,21$  s i dopuszczalnym czasie pogłosu pomieszczenia  $T_0 = 0,51$  s, dopuszczalny równoważny poziom dźwięku A dźwięku maskującego wynosił 37,1 dB. W badaniach [23] wykazano, że wartość poziomu dźwięku

A dźwięku maskującego, o widmie szumu różowego, powinna mieścić się w przedziale 30–37,1 dB. Wynika z tego, że w wielkoprzestrzennych pomieszczeniach biurowych *open space* w obszarze pracy pracowników maksymalna różnica poziomów dźwięku A maskującego o widmie szumu różowego nie powinna przekraczać ok. 7 dB.

Stąd kolejne kryterium:

Kryterium 8: Maksymalna różnica w obszarze pracy pracowników w biurowym pomieszczeniu wielkoprzestrzennym *open space* poziomów dźwięku A dźwięku maskującego o widmie szumu różowego:  $\Delta L_{p,A,max} \leq 7$  dB.

Kryterium 8 jest kryterium dotyczącym równomierności nagłośnienia na stanowiskach pracy lub – szerzej – w obszarze pracy w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych. Obszar pracy definiuje się jako część płaszczyzny (wewnątrz pomieszczenia) równoległej do podłogi w odległości 1,2 m od niej, tj. na wysokości głowy osoby siedzącej.

Typowe instalacje systemów maskujących mają postać pojedynczych głośników umieszczonych w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym. Głośniki te rozmieszcza się w postaci regularnej siatki źródeł dźwięku. W literaturze podaje się bardzo różną gęstość rozmieszczenia głośników w systemach maskujących. Z wcześniejszych badań obliczeniowych autora niniejszej pracy [8],

których rezultat przedstawiono na rycinie 2, wynika, że do równomiernego [wg kryterium 8 (wzór 8)] nagłośnienia pomieszczenia (o kubaturze ok. 416 m<sup>3</sup>) dźwiękiem maskującym wystarczającą liczbą głośników jest ok. 12. Liczba ta jest mniejsza niż podana w niektórych doniesieniach [7], w których sugerowano, że na pracownika powinno przypadać 0,76 źródła dźwięku maskującego (w rozpatrywanym przypadku [8], w którym uwzględniono 21 stanowisk pracy, liczba źródeł maskujących powinna wtedy wynosić:  $0,76 \times 21 = 15,96$ ).

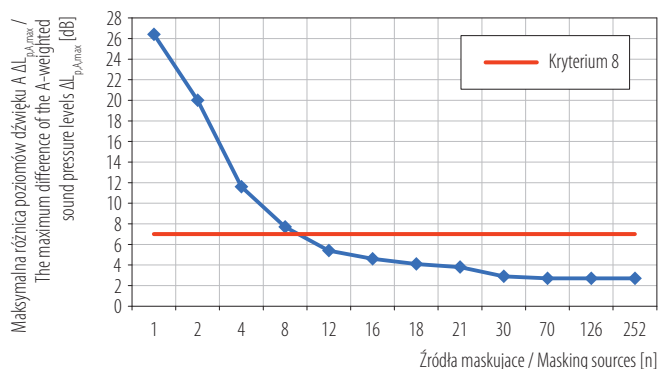
Ponieważ głośniki instaluje się jako element kasetonu w dźwiękochłonnym suficie podwieszonym, to stanowią one ok. 8% powierzchni sufitu dźwiękochłonnego. Zmniejszenie liczby źródeł maskujących (przy zachowaniu równomiernego nagłośnienia dźwiękiem maskującym) jest więc celowe nie tylko ze względów możliwości zmniejszenia komplikacji systemu maskującego (zatem i kosztów), ale także uzyskania większej chłonności akustycznej sufitu.

Przyjmując ww. zależności, dla rozpatrywanego w niniejszym artykule pomieszczenia o kubaturze 210 m<sup>3</sup>, w którym znajduje się 18 stanowisk pracy, liczba źródeł maskujących powinna być  $\geq 14$  ( $18 \times 0,76 = 13,68$ ). Ponieważ – jak wykazano wcześniej – dokładne badania obliczeniowe pozwalają ograniczyć liczbę źródeł maskujących, to dla rozpatrywanego w artykule pomieszczenia przeprowadzono badania obliczeniowe programem ODEON [24] relacji między równomiernością nagłośnienia systemem maskującym składającym się ze źródeł-głośników (każdy umieszczony oddzielnie w elemencie sufitu podwieszanego, oś głośnika skierowana w dół) a liczbą i rozmieszczeniem źródeł-głośników. Jako kryterium równomiernego nagłośnienia pomieszczenia dźwiękiem maskującym zastosowano kryterium (wzór 8).

W rozpatrywanym pomieszczeniu ze względu na stosunkowo długi czas pogłosu, jak na pomieszczenia biurowe *open space* o dobrej akustyce, maksymalny poziom dźwięku A jest równy ok. 39 dB (wzór 2), co może skłaniać do zwiększenia wartości kryterialnej  $\Delta L_{p,A,max}$ . Ze względu jednak na możliwość zastosowania przyjętego sposobu oceny równomierności nagłośnienia do innych, większych pomieszczeń nie zmieniano ww. kryterium ani wartości kryterialnej  $\Delta L_{p,A,max}$ .

Źródła-głośniki umieszczono w 1 rzędzie bądź 2 lub 3 rzędach (rzędy były równoległe do dłuższego boku pomieszczenia).

Na rycinie 3 pokazano szkic rzutu pomieszczenia na powierzchnię pomiarową ( $h = 1,2$  m) z siatką



**Rycina 2.** Maksymalna różnica poziomów dźwięku A maskującego  $\Delta L_{p,A,max}$  w obszarze pracy dla różnej liczby źródeł dźwięku (kryterium równomierności, zależność nr 8)

**Figure 2.** The maximum difference of the A-weighted sound pressure levels  $\Delta L_{p,A,max}$  of the masking sound in workzone for a different number of masking sources (uniformity criterion, relation No. 8)

punktów pomiarowych/obliczeniowych (oznaczonych gwiazdkami;  $h = 1,2$  m). Źródła-głośniki są umieszczone w dźwiękochłonnym suficie podwieszonym, na rzucie pomieszczenia w wybranych miejscach siatki punktów pomiarowych.

Wyniki obliczeń zależności między równomiernością nagłośnienia pomieszczenia dźwiękiem maskującym (określanej wielkością maksymalną różnicą poziomu dźwięku A na powierzchni pomiarowej  $\Delta L_{p,A,max}$ ) a liczbą i rozmieszczeniem źródeł-głośników maskujących podano w tabeli 1.

W rozpatrywanym w niniejszym artykule pomieszczeniu przyjęte kryterium (zależność 8) jest spełnione, gdy uwzględni się minimum 8–9 źródeł maskujących w postaci oddzielnie umieszczonych głośników w suficie podwieszonym (tabela 1, nr 7–9, 13–16 i 19–22). Dla tej liczby źródeł (8–9) największą równomierność nagłośnienia dźwiękiem maskującym (najmniejsza wartość maksymalnej różnicy poziomu dźwięku A na powierzchni pomiarowej  $\Delta L_{p,A,max}$ ) uzyskuje się, gdy 8 źródeł-głośników maskujących umieszczi się w układzie  $2 \times 4$ , czyli w 2 rzędach po 4 źródła ( $\Delta L_{p,A,max} = 5,7$  dB; tabela 1, nr 13). Głośniki są wówczas umieszczone w siatce punktów o wymiarach oczek  $3,6 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$ . [Właśnie ten wynik badania, w którym źródła-głośniki maskujące są umieszczone w 4 kolumnach siatki źródeł dźwięku po 2 głośniki, skłonił autora do zastąpienia 2 głośników (w kolumnie siatki źródeł dźwięku) 1 kolumną dźwiękową opisaną dalej]. W tabeli 1 (nr 22) pokazano także, że nawet w przypadku zastosowania bardzo dużej liczby źródeł maskujących (tj. w siatce punktów, w której źródła są w odległości 0,6 m) uzyskana wartość maksymalnej różnicy poziomu

1	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*
4	*	*	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	*	*	*
9	*	*	*	*	*	*	*
10	*	*	*	*	*	*	*
11	*	*	*	*	*	*	*
12	*	*	*	*	*	*	*
13	*	*	*	*	*	*	*
14	*	*	*	*	*	*	*
15	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*
17	*	*	*	*	*	*	*
18	*	*	*	*	*	*	*
19	*	*	*	*	*	*	*
20	*	*	*	*	*	*	*
21	*	*	*	*	*	*	*

| Źródła dźwięku maskującego w kształcie piramid / The pyramid masking sound source.

\* Punkty pomiarowe ( $h = 1,2$  m) i jednocześnie źródła-głośniki dźwięku maskującego ( $h = 3$  m) / The measurement point ( $h = 1,2$  m) and the loudspeaker masking sources ( $h = 3$  m).

Kolorem zielonym i żółtym oznaczono linie pomiarowe / Measurement lines are marked with green and yellow color.

**Rycina 3.** Rzut pomieszczenia z siatką pomiarową (oczko siatki  $0,6$  m  $\times$   $0,6$  m)

**Figure 3.** Projection of the room with a measuring grid (the mesh size is  $0.6$  m  $\times$   $0.6$  m)

dźwięku A na powierzchni pomiarowej  $\Delta L_{p,A,max}$  nie jest bliska 0 (jest równa  $3,9$  dB).

## MATERIAŁ I METODY

### Zastosowana pomiarowa metoda badań równomierności nagłośnienia pomieszczenia dźwiękiem maskującym wytworzonym przez 4 kolumny dźwiękowe

Przedmiotem badań było określenie metodą pomiarową równomierności nagłośnienia dźwiękiem maskującym pomieszczenia biurowego o kubaturze  $210$  m<sup>3</sup> za pomocą 4 kolumn dźwiękowych w kształcie piramid. W pomieszczeniu znajdowało się 18 stanowisk pracy.

W publikacji autora [8] obliczeniowo wykazano możliwość uzyskania równomiernego nagłośnienia dźwiękiem maskującym pomieszczenia (o dwukrotnie większej kubaturze niż rozpatrywane) przy zastosowaniu tylko 4 źródeł-kolumn dźwięku maskującego. Jest to możliwe, ponieważ zastosowanie takich źródeł dźwięku zmniejsza emisję dźwięku promieniowanego w kierunku pionowym w dół od takiego źródła, w porównaniu z pojedynczym głośnikiem. Pozwala to zmniejszyć maksymalny poziom dźwięku A na stanowisku pracy bezpośrednio pod źródłem. W konsekwencji zmniejsza się maksymalna różnica poziomów dźwięku maskującego w całym obszarze pracy (warunek 8).

Zmianę charakterystyki kierunkowej emisji dźwięku źródła maskującego uzyskuje się, zastępując pojedyncze głośniki 4-głośnikową kolumną dźwiękową, w której osie główne głośników nie są skierowane pionowo w dół. W porównaniu z systemem maskującym z pojedynczymi głośnikami w suficie podwieszonym głośniki zastosowane w kolumnie dźwiękowej mogą cechować się znacznie mniejszymi rozmiarami i mocami elektrycznymi (znamionowymi) oraz być znacznie tańsze. W artykule podano wyniki badań pomiarowych równomierności nagłośnienia dźwiękiem maskującym wytworzonym przez 4 kolumny dźwiękowe w kształcie piramid [opracowane w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym (CIOP-PIB); kąt nachylenia ścian bocznych piramidy do podstawy:  $65^\circ$  (rycina 4)].

W badaniach równomierności nagłośnienia dźwiękiem maskującym zastosowano metodę pomiarową. W pomieszczeniu o wymiarach  $14$  m  $\times$   $5$  m  $\times$   $3$  m (kubatura:  $210$  m<sup>3</sup>) i średnim czasie pogłosu w zakresie częstotliwości  $500$ – $2000$  Hz  $T_{mf} = 0,40$  s umieszczono w suficie podwieszonym 4 kolumny dźwiękowe

**Tabela 1.** Wyniki obliczeń maksymalnej różnicy poziomu dźwięku A na powierzchni pomiarowej dla różnej liczby źródeł-głośników maskujących umieszczonych w 1 rzędzie bądź 2 lub rzędach w suficie podwieszanym, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 2021

**Table 1.** The results of calculations of the maximum A-weighted sound pressure level difference on the measurement area for a different number of masking-sound sources-loudspeakers placed in 1, 2 and 3 rows in the suspended ceiling, Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, 2021

Badanie obliczeniowe [nr] Computational test [No.]	Źródła maskujące [n] Masking sources [n]	Kolumny źródeł maskujących Columns for masking sources [n]	Rzędy źródeł maskujących [n] Rows of masking sources [n]	Maksymalna różnica poziomu dźwięku A na powierzchni pomiarowej $\Delta L_{p,A,max}$ Maximum A-weighted sound pressure level difference on the measurement area $\Delta L_{p,A,max}$ [dB]
1	1	1	1	17,2
2	2	2	1	11,7
3	3	3	1	10,4
4	4	4	1	8,8
5	5	5	1	7,5
6	6	6	1	7,2
7	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>7,0</b>
8	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>1</b>	<b>6,8</b>
9	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>1</b>	<b>6,6</b>
10	2	1	2	14,3
11	4	2	2	9,5
12	6	3	2	7,9
13	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>5,7</b>
14	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>4,7</b>
15	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>4,8</b>
16	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>4,5</b>
17	3	1	3	13,6
18	6	2	3	8,9
19	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>6,9</b>
20	<b>12</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>5,6</b>
21	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4,7</b>
22	<b>132</b>	<b>22</b>	<b>6</b>	<b>3,9</b>

Pogrubione wartości spełniają wymagania określone wzorem 8 / The values in bold meet the requirements specified in formula 8.

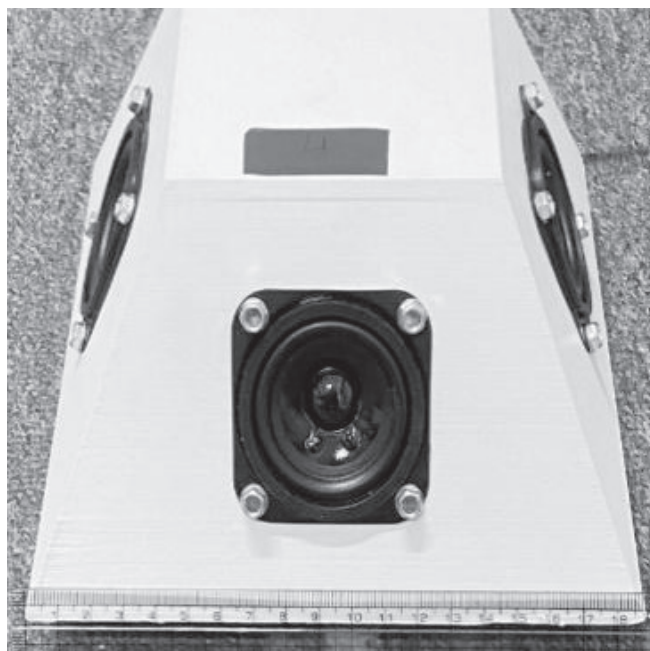
(na rycinie 3 – źródła maskujące w kształcie piramid zaznaczono pogrubioną kreską) emitujące dźwięk maskujący. Taki system maskujący umożliwił uzyskanie w obszarze pracy dźwięku o płaskiej charakterystyce częstotliwościowej w zakresie częstotliwości 100–10 000 Hz z dokładnością do  $\pm 1,5$  dB. Metodą pomiarową określano poziom dźwięku A dźwięku maskującego w punktach pomiarowych (rycina 3).

Równomierność nagłośnienia dźwiękiem maskującym określono:

- rozkładem wartości poziomu dźwięku A maskującego na płaszczyźnie pomiarowej na wysokości 1,2 m od podłogi (w punktach pomiarowych jak na

rycinie 3 – punkty oznaczone gwiazdkami, a wartości i orientacyjną mapę podano w tabeli 2),

- poziomami dźwięku A maskującego w punktach pomiarowych na kolorowych liniach pomiarowych jak podano na rycinach 5a i 5b (w punktach pomiarowych, na liniach pomiarowych, których lokalizację pokazano na rycinie 3),
- odsetkiem punktów pomiarowych w obszarze pracy, w których poziom dźwięku A maskującego zawiera się w klasach 0,5 dB (rycina 6),
- wartościami maksymalnej różnicy poziomów dźwięku A  $\Delta L_{p,A,max}$  dźwięku maskującego, na płaszczyźnie pomiarowej.



Rycina 4. Źródło dźwięku maskującego – kolumna dźwiękowa (piramida o podstawie kwadratowej o boku 19,7 cm)

Figure 4. The masking sound source – masking column (pyramid with a square base, side 19.7 cm)

## WYNIKI

Wyniki badań pomiarowych przedstawiono w tabeli 2 oraz na rycinach 5 i 6.

## OMÓWIENIE

### Wyniki badań równomierności nagłośnienia pomieszczenia

#### zastosowanym systemem dźwięku maskującego

W celu uzyskania odpowiednich akustycznych warunków pracy w biurowych pomieszczeniach wielko-przestrzennych *open space* konieczne jest zastosowanie odpowiedniej adaptacji akustycznej, a w przypadku pomieszczeń o małym poziomie tła akustycznego – wytworzenie tła akustycznego za pomocą dźwięków maskujących. Przedmiotem badań była weryfikacja pomiarowa tezy o możliwości zastosowania w tych pomieszczeniach znacząco mniejszej liczby źródeł maskujących (od używanej w obecnych systemach maskujących), przy jednoczesnym zachowaniu skuteczności efektu maskowania dźwięków utrudniających pracę pracowników.

Kryteria określające właściwości akustyczne pomieszczenia biurowego, do których spełnienia konieczne jest zastosowanie dźwięków maskujących, są oparte na zrozumiałości mowy, a są nimi promień rozproszenia

i promień prywatności (wg PN-EN ISO 3382-3 [12]). Ponieważ tylko dla promienia rozproszenia  $r_D$  jest określona wartość kryterialna [12], to właśnie ją zastosowano do wyznaczania minimalnego poziomu i odpowiedniego widma dźwięku maskującego. Dla dźwięku maskującego o widmie szumu różowego (jednakowe poziomy ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości) dźwięk maskujący musi mieć poziom dźwięku  $A > 30$  dB, aby spełniał ww. kryterium, tj. promień rozproszenia  $r_D \leq 5$  m (rycina 1). Poziom ten przyjęto jako minimalny poziom dźwięku maskującego (dla widma szumu różowego) na płaszczyźnie pomiarowej, czyli w obszarze pracy pracowników.

W normach i rozporządzeniach nie jest obligatoryjnie określony maksymalny poziom dźwięku  $A$  dźwięku maskującego (oczywiście poza dopuszczalnym równoważnym poziomem dźwięku  $A$  od wszystkich źródeł hałasu łącznie, na rozpatrywanych stanowiskach pracy ze względu na możliwość realizacji podstawowych zadań – 55 dB wg PN-N-01307 [1]). W niniejszym artykule przyjęto więc, że nie może on przekroczyć wartości dopuszczalnej równoważnego poziomu dźwięku  $A$  od wyposażenia technicznego budynku, tj. wartości ok. 37–40 dB (wartość ta jest określana indywidualnie dla każdego pomieszczenia i zależy od czasu pogłosu pomieszczenia i wartości kryterialnej podanej w PN-B-02151-2 [10] = 40 dB).

Wynika z tego, że na wszystkich stanowiskach pracy poziom dźwięku  $A$  dźwięku maskującego, o widmie szumu różowego, musi się zawierać w przedziale ok. 30–37 dB. Oznacza to, że maksymalna różnica poziomu dźwięku  $A$  maskującego, o widmie szumu różowego, w obszarze pracy w pomieszczeniu nie może przekroczyć 7 dB. Spełnienie tego kryterium na równomierność nagłośnienia dźwiękiem maskującym pomieszczenia implikuje rozwiązania techniczne systemów emitujących dźwięki maskujące w pomieszczeniu. Z badań obliczeniowych autora niniejszej pracy wynika (rycina 2, tabela 1), że konieczne jest zastosowanie 8–16 źródeł maskujących (którymi są pojedyncze głośniki umieszczone w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym). W badaniach obliczeniowych wykazano także, że liczbę źródeł maskujących można ograniczyć, gdy pojedyncze źródło maskujące jest kolumną dźwiękową.

Wynika to z tego, że można wówczas znacznie ograniczyć kierunkową emisję dźwięku maskującego pionowo w dół (główna oś pojedynczo zastosowanych głośników), umieszczając osie kilku głośników w kolumnach dźwiękowych w różnych kierunkach. Poprawia



**Tabela 2.** Wyniki pomiarów poziomu dźwięku A w punktach pomiarowych jak na rycinie 3, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 2021

**Table 2.** The A-weighted sound pressure level measurement results in the measurement points as in Figure 3, Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, 2021

Wiersz [nr] Line [No.]	Poziom dźwięku A w kolumnach A-weighted sound pressure level in columns [dB]						
	1	2	3	4	5	6	7
1	30,6	31,5	33	32,2	32,5	33,1	32,6
2	32,1	31,9	32,7	33,6	34,3	33,5	33,6
3	32,6	32,8	33,3	35,6	35,6	34,3	34
4	32,2	32,5	33,8	34	34	33,7	33,7
5	33	33,6	33,6	33,5	33,9	34,6	34,7
6	33,6	34,1	33,7	33,7	33,5	34,6	34,6
7	32,8	33,3	34,8	35,1	35,2	34,4	34,8
8	33,8	34,2	34,6	36,3	35,2	34,9	33,9
9	33,7	33,5	34,1	35,2	35,7	34,3	33,9
10	33,6	33,6	35,3	34,6	34,5	35,2	35,4
11	34	34,3	35,4	34	34,5	34,4	36,1
12	33,8	34,4	34,1	34,9	34,6	35,5	34,3
13	34,2	34	34,4	36,8	35	34,4	34,5
14	33,7	33,7	35,7	35,2	36,6	34,6	35
15	34,1	34,7	34,4	34,5	33,8	34,8	34,2
16	34,1	33,9	34	34	33,5	34,4	34,6
17	33,7	33,6	34,2	35,3	35,1	34,3	34,4
18	33,8	33,8	34,6	35	34,9	34	34,8
19	33,5	33,3	34	34,3	34,2	34,6	33,8
20	33	33,2	33,5	33,3	33,6	34,2	34,8
21	33	32,9	32,9	32,7	32,9	33,4	33,3

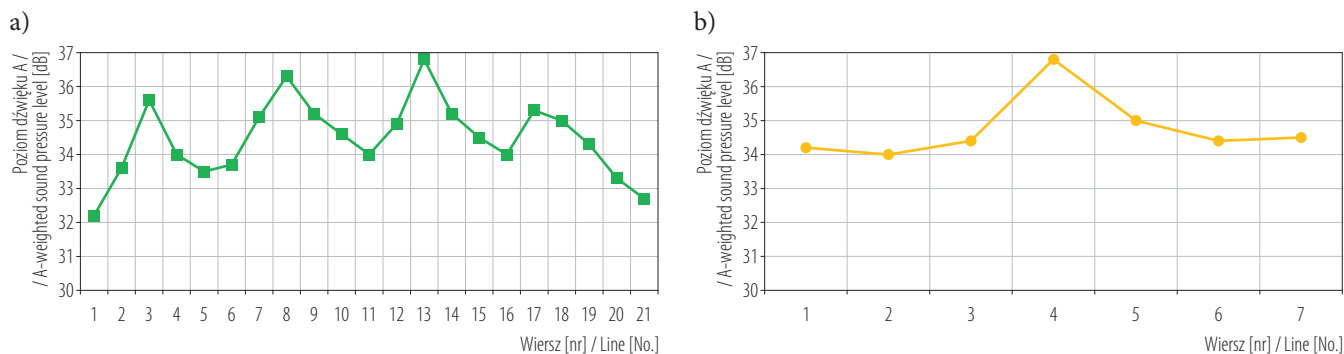
Położenie źródeł dźwięku maskującego w kształcie piramid zaznaczono grubymi kreskami / The position of the pyramid masking sound sources is marked with thick lines.  
Kolorami graficznie zilustrowano wartości poziomu dźwięku A / The colors illustrate the A-weighted sound pressure level graphically.

to równomierność nagłośnienia dźwiękiem maskującym pomieszczenia, ogranicza powierzchnię sufitu zajęta przez źródła maskujące oraz umożliwia zastosowanie w kolumnach dźwiękowych głośników o znacznie zredukowanych wymiarach i mniejszej mocy elektrycznej (znamionowej). W CIOP-PIB opracowano taką kolumnę dźwiękową (kolumna dźwiękowa w kształcie piramidy ze ściętym czubkiem, na każdej z 4 ścian bocznych 1 głośnik).

W badaniach obliczeniowych wykazano, że stosując źródła-kolumny dźwięku maskującego, można ograniczyć ich liczbę do 4. Ponieważ jednak wiarygodność wyników badań obliczeniowych może być ograniczona różnymi przyczynami (m.in. niemożnością uwzględnienia w badaniach obliczeniowych w pełni rzeczywistych charakterystyk kierunkowych głośników ani

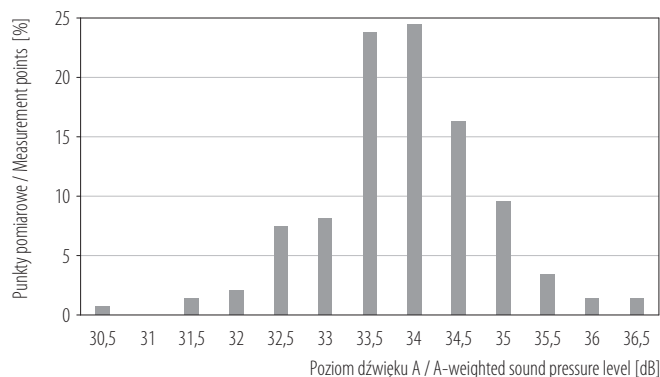
wpływu obudów na promieniowany dźwięk maskujący z kolumny dźwiękowej), dlatego weryfikację tezy przeprowadzono metodami pomiarowymi.

Pomiary przeprowadzono w pomieszczeniu o kubaturze 210 m<sup>3</sup> o warunkach akustycznych zbliżonych do wielkoprzestrzennego pomieszczenia biurowego *open space* (m.in. czas pogłosu  $T_{mf} = 0,4$  s). W niniejszym artykule poddano wyniki tych badań. Określono rozkład poziomu dźwięku A na powierzchni płaszczyzny na wysokości głowy osoby siedzącej ( $h = 1,2$  m). Rozkład poziomów dźwięku A pokazano orientacyjnie w postaci kolorowej mapy w tabeli 2. Maksymalne wartości poziomu dźwięku występowały w bliskiej odległości od źródeł maskujących (35,3–36,8 dB), a najmniejsze – w rogach pomieszczenia (30,6–33,3 dB). Z wartości przedstawionych w tabeli 2 i na rycinie 6 wynika, że



**Rycina 5.** Poziom dźwięku A dźwięku maskującego w punktach pomiarowych na tzw. a) zielonej i b) żółtej linii pomiarowej (rycina 3), Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 2021

**Figure 5.** A-weighted sound pressure level of masking sound at measurements points on the so-called a) green and b) yellow measurements line (Figure 3), Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, 2021



**Rycina 6.** Punkty pomiarowe w obszarze pracy, w których poziom dźwięku A maskującego zawiera się w klasach 0,5 dB, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, 2021

**Figure 6.** Measurement points in the work area where A-weighted sound pressure level of masking sound is within the 0.5 dB classes, Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, 2021

maksymalna różnica poziomu dźwięku A maskującego na powierzchni pomiarowej wynosi  $\Delta L_{p,A,max} = 6,2$  dB (wg ww. kryterium  $\Delta L_{p,A,max} \leq 7$  dB), tzn. w obszarze pracy uzyskano wymaganą równomierność nagłośnienia dźwiękiem maskującym. Wartości poziomów dźwięku A dźwięku maskującego pokazano również na 2 liniach pomiarowych równoległych do podłogi wzdłuż i w poprzek pomieszczenia (położenie linii pomiarowych: rycina 3; wyniki: rycina 5).

Reasumując, zastosowane rozwiązanie w postaci nagłośnienia pomieszczenia dźwiękiem maskującym generowanym przez źródła-kolumny dźwiękowe w kształcie piramid zapewnia uzyskanie w obszarze pracy dźwięków maskujących umożliwiających skuteczne maskowanie niepożądanych dźwięków mowy, a więc razem z adaptacją akustyczną pomieszczenia spełnia wszystkie kryteria akustyczne środowiska pracy w biurowych pomieszczeniach *open space*.

## WNIOSKI

W przeprowadzonych badaniach obliczeniowych i pomiarowych wykazano, że do spełnienia wszystkich wymogów akustycznych biurowych pomieszczeń wieloprzestrzennych *open space* (PN-B-02151-4 [11], PN-EN ISO 3382-3 [12], PN-B-02151-2 [10] i PN-N-01307 [1]) konieczne jest zastosowanie adaptacji akustycznej pomieszczenia i stanowisk pracy, w tym dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, wykładziny dźwiękochłonnej na podłodze, ekranów akustycznych itp., oraz wykorzystanie maskowania dźwięków mowy. Dźwięk maskujący musi cechować się odpowiednim poziomem i widmem częstotliwościowym. Dla dźwięku maskującego, którego widmo jest szumem różowym, minimalna wartość poziomu dźwięku A jest równa 30 dB. Maksymalna wartość poziomu dźwięku maskującego (przyjęta na równą maksymalnej wartości poziomu dźwięku od wyposażenia technicznego budynku) wynosi 37–40 dB (wartość ta zależy od właściwości pogłosowych pomieszczenia oraz wzorcowego maksymalnego poziomu dźwięku A podanego w PN-B-02151-2 [10]).

Wynika z tego, że systemy maskujące muszą umożliwiać wytworzenie dźwięku maskującego na wszystkich stanowiskach pracy, dla widma szumu różowego, o poziomie dźwięku A z zakresu 30–37 dB. To implikuje konieczność uzyskania przez systemy maskujące maksymalnej różnicy wartości poziomu dźwięku A dźwięku maskującego, na stanowiskach pracy w rozpatrywanych pomieszczeniach, <7 dB. Stwarza to konieczność zastosowania dużej liczby źródeł-głośników maskujących. Autor niniejszego artykułu zaproponował inny skuteczny i zweryfikowany pomiarowo system składający się tylko z 4 kolumn dźwiękowych w kształcie piramid.

## PODZIĘKOWANIA

Autor dziękuje Panu inż. Adamowi Swidzińskiemu i firmie ECO-TECH za pomoc w wykonaniu elementów źródła maskującego.

## PIŚMIENNICTWO

1. PN-N-01307:1994. Hałas – Dopuszczalne wartości parametrów hałasu w środowisku pracy – Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1994.
2. Mikulski W. Wyniki badań hałasu w otwartym pomieszczeniu biurowym – case study w pomieszczeniu o dużej chłonności akustycznej. Proceedings of the XLVII Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki Konferencje; 2019 Feb 25–Mar 1; Szczyrk, Poland. Oddział Górnośląski PTA oraz Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk.
3. Khaled I. Sound Masking in the Office and It's Benefits. HSSE WORLD [Internet]. [cited 2021 Dec 30]. Available from: <https://hsseworld.com/sound-masking-in-the-office-and-its-benefits>.
4. Hongisto VO. Effect of sound masking on workers in an open office. Proceedings of the EURONOISE Conference; 2008 Jun 29–Jul 4; Paris, France.
5. Acun V, Yilmaz S. A grounded theory approach to investigate the perceived soundscape of open-plan offices. Applied Acoustics 2018;131:28–37. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.09.018>.
6. Rindel JH. Open plan office acoustics – a multidimensional optimization problem. Proceedings of the DAGA Conference; 2018 Mar 19–22; Munich, Germany.
7. Mueller BJ, Dickschen A, Martin N. How reliable are ISO 3382-3:2012 measurements to predict employee satisfaction with acoustics in open space offices? Preliminary results of multiple measurements. Proceedings of the Forum Acusticum Conference; 2020 Dec 7–11; Lyon, France.
8. Mikulski W, Swidziński A. Masking sound distribution in open plan office room – case study base on simulation, Proceedings of the 27th International Congress on Sound and Vibration ICSV27 Conference; 2021 Jul 11–16; Praha, Czech Republic.
9. Mikulski W. Rozkład poziomu dźwięku maskującego w pomieszczeniu biurowym open space. In: Postępy Akustyki. Kraków: Polskie Towarzystwo Akustyczne Oddział w Krakowie; 2021. p. 15–23 (ISBN: 978-83-61402-02-2).
10. PN-B-02151-2:2018. Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2018.
11. 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.
12. PN-EN ISO 3382-3:2012. Akustyka. Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń. Część 3: Pomieszczenia biurowe typu “open space”. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2012.
13. Mikulski W. Badania obliczeniowe zrozumiałości mowy w pomieszczeniach biurowych open space. Med Pr. 2019; 70(3):327–342. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00726>.
14. Mikulski W. Studies on acoustic properties of open-plan office rooms. In: Pleban D, editor. Occupational noise and workplace acoustics, Advances in Measurement and Assessment techniques. London New York: CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton; 2021. p. 173–220. [cited 2021 Dec 30]. Available from: <https://www.routledge.com/Occupational-Noise-and-Workplace-Acoustics-Advances-in-Measurement-and/Pleban/p/book/9780367499259>.
15. Mikulski W. Warunki akustyczne w pomieszczeniach biurowych open space – wyniki badań pilotażowych. Med Pr. 2016;67(5):653–662. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00425>.
16. 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>.
17. Mikulski W. Ocena w skali trzystopniowej właściwości akustycznych biurowego pomieszczenia open space o dużej kubaturze – opis przypadku. Med Pr. 2021;72(4):375–390. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.01106>.
18. 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>.
19. Edgington C, Stevens M. Practical considerations and experiences with sound masking's latest technology. Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration Conference; 2017 Jul 23–27; London, Great Britain.
20. Davidsson F, Hodsman P. Speech propagation in open-plan office: A cross over designed field study, Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration Conference; 2017 Jul 23–27; London, Great Britain.
21. Haapakangas A, Hongisto V. Distraction distance and perceived disturbance by noise – An analysis of 21 open-plan offices. Journal of the Acoustical Society of America 2017;141(1):127–136. <https://doi.org/10.1121/1.4973690>.

22. Mikulski W. Wpływ tła akustycznego na promień rozproszenia w pomieszczeniach biurowych wielkoprzestrzennych, Proceedings of the XLVIII Szkoła Zimowa Akustyki Środowiska i Wibroakustyki Konferencje; 2020 Feb 24–28: p. 7–15; Gliwice–Szczyrk, Poland.
23. Mikulski W. Wpływ dźwięku maskującego na zrozumiałość niepożądanego dźwięków mowy 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>.
24. ODEON Room Acoustics Software [Internet]. [cited 2021 Dec 30]. Available from: <https://odeon.dk/product/what-is-odeon>.