

dr inż. LESZEK MORZYŃSKI (ORCID: 0000-0003-3534-3284)

inż. ADAM SWIDZIŃSKI (ORCID: 0000-0002-3362-013X)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

RADEK ŠTRAMBERSKÝ (ORCID: 0000-0002-5239-7025)

Department of Control Systems and Instrumentation, VSB – Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic

PAULA PAVALUCA

Faculty of Engineering, „Lucian Blaga” University of Sibiu, Romania

Kontakt: lmorzyns@ciop.pl

DOI: 10.54215/BP.2021.12.10.Morzynski

# Obrazowanie akustyczne – zalety i możliwości zastosowania w zwalczaniu zagrożenia hałasem

Fot. magicleaf/Bigstockphoto



Identyfikacja źródeł hałasu jest jednym z istotnych elementów procesu ograniczania tego zagrożenia w środowisku pracy. Umożliwia wskazanie dominującego źródła hałasu oraz ułatwia dobór rozwiązań i środków technicznych mających na celu jego ograniczenie. Identyfikacja źródeł hałasu z zastosowaniem tradycyjnych technik pomiarowych i przyrządów pomiarowych z pojedynczym mikrofonem czy sondą natężeniową jest czasochłonna, a w wielu przypadkach bardzo trudna. Odzworowanie parametrów pola akustycznego w postaci graficznej znakomicie ułatwia proces lokalizacji źródeł energii akustycznej oraz dróg jej propagacji. Obrazowanie akustyczne, inaczej wizualizacja dźwięku, jest graficzną formą prezentacji zjawisk akustycznych, w której parametry emitowanego hałasu przedstawiane są w postaci barwnej mapy nałożonej na obraz jego źródła. W artykule omówiono jedną z podstawowych technik obrazowania akustycznego, jaką jest beamforming, oraz urządzenia do obrazowania akustycznego z zastosowaniem tej techniki, czyli kamery akustyczne. Na przykładach wyników badań laboratoryjnych i w warunkach rzeczywistych przedstawiono zalety i możliwości wykorzystania tej techniki oraz jej ograniczenia.

*Słowa kluczowe: hałas, obrazowanie akustyczne, wizualizacja dźwięku, kamera akustyczna, beamforming*

## Sound visualization – advantages and applications in fighting the hazard of noise

Identification of noise sources is one of the important elements of the process of reducing noise hazards in the work environment. It enables the indication of the dominant noise source and facilitates the selection of solutions and technical measures aimed at reducing it. Identifying noise sources using traditional measurement techniques and measuring instruments with a single microphone or intensity probe is time consuming and in many cases very difficult. Graphical mapping of acoustic field parameters greatly facilitates the process of locating sources of acoustic energy and its propagation paths. Sound visualization, is a graphic form of presentation of acoustic phenomena, in which the parameters of the emitted noise are presented in the form of a color map superimposed on the image of its source. The article discusses one of the basic techniques of acoustic imaging, which is beamforming, and acoustic imaging devices using this technique, i.e. acoustic cameras. The advantages and possibilities of using this technique, as well as its limitations, are discussed on the basis of measurement results carried out in laboratory and in real conditions.

*Keywords: noise, sound visualization, acoustic camera, beamforming*

## Wstęp

Obrazowanie akustyczne, inaczej wizualizacja dźwięku [1, 2], jest graficzną formą prezentacji zjawisk akustycznych, w której parametry pola akustycznego (np. poziom ciśnienia akustycznego czy prędkość akustyczna) na wybranej płaszczyźnie lub w wybranym obszarze przestrzeni przedstawiane są w postaci barwnej mapy nałożonej na obraz tej przestrzeni. Obrazowanie akustyczne ma obecnie szerokie zastosowanie w obszarze zwalczania zagrożeń hałasem [3] w środowisku pracy.

Skuteczne zwalczanie hałasu poprzez zastosowanie różnego rodzaju środków technicznych wymaga w pierwszej kolejności zidentyfikowania jego źródeł (określenia ich położenia) i oceny ich parametrów. Pozwala to m.in. na wskazanie dominującego źródła, tj. odgrywającego największą rolę w emisji hałasu. Identyfikacja może się odbywać na różnych poziomach szczegółowości – od określonej maszyny czy urządzenia [4-7], przez ciąg produkcyjny czy obszar hali fabrycznej, do całego przedsiębiorstwa przemysłowego [8]. Wiele maszyn i urządzeń stosowanych w przemyśle stanowi złożone źródła hałasu, zbudowane z licznych źródeł cząstkowych. Ich identyfikacja na poziomie danej maszyny, zwłaszcza na etapie jej projektowania, umożliwia wprowadzenie odpowiednich zmian konstrukcyjnych redukujących hałas u źródła jego powstawania lub też pozwala na zastosowanie dodatkowych elementów konstrukcyjnych redukujących hałas, takich jak tłumiki hałasu czy osłony dźwiękoizolacyjne hałaśliwych podzespołów. Na wyższym poziomie, obejmującym np. ciąg produkcyjny czy halę fabryczną, celem identyfikacji jest znalezienie maszyny lub urządzenia emitującego najwięcej hałasu. Dzięki temu można np. wykonać odpowiednią obudowę dźwiękoizolacyjną lub wymienić urządzenie na mniej hałaśliwe. Identyfikacja źródeł hałasu jest również pomocna w ograniczaniu hałasu emitowanego do środowiska przez przedsiębiorstwa przemysłowe [8].

Dotyczy to zwłaszcza fabryk, w których wiele urządzeń i instalacji mogących emitować hałas znajduje się na zewnątrz pomieszczeń i hal. Znalezienie źródeł dominujących pozwala na podjęcie działań ograniczających zanieczyszczenie środowiska hałasem. We wszystkich przedstawionych przypadkach identyfikacja źródeł hałasu z zastosowaniem tradycyjnych technik pomiarowych i przyrządów pomiarowych z pojedynczym mikrofonem czy sondą natężeniową jest czasochłonna, a często bardzo trudna. Odzworowanie parametrów pola akustycznego w postaci graficznej znakomicie ułatwia proces lokalizacji źródeł energii akustycznej oraz dróg jej propagacji.

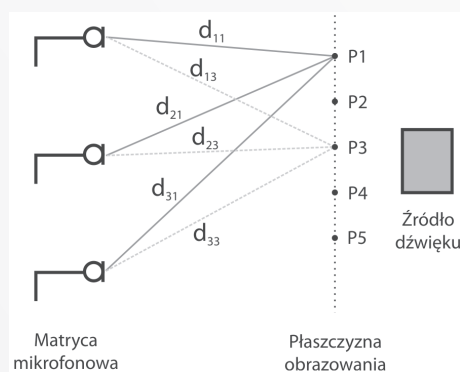
Istnieją różne techniki wykorzystywane w obrazowaniu akustycznym, takie jak: holografia akustyczna [1], beamforming (stosowana jest również polska nazwa: kształtowanie wiązki) [1, 5] czy technika bezpośredniej wizualizacji dźwięku [2, 6]. Każda z nich ma swoje zalety i wady, wynikające z podstaw matematyczno-fizycznych. Na uzyskiwane wyniki obrazowania mają wpływ zarówno wspomniane podstawy, jak i sama konstrukcja przyrządów pomiarowych wykorzystujących te metody. To powoduje, że stosowanie technik obrazowania akustycznego i interpretacja uzyskanych wyników są zagadnieniami złożonymi i wymagającymi doświadczenia.

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości zastosowania w obrazowaniu akustycznym techniki beamformingu oraz jej zalet i wad na przykładzie badań własnych.

## Beamforming i kamera akustyczna

W przeciwieństwie do techniki bezpośredniej wizualizacji dźwięku, w której mapę barwną rozkładu parametrów pola akustycznego uzyskuje się na podstawie bezpośredniego pomiaru wizualizowanej wielkości, beamforming jest jedną z technik, w której wartości danej wielkości akustycznej, służące do utworzenia barwnej mapy obrazującej rozkład tej wielkości w wybranej płaszczyźnie, wyznacza się na podstawie pomiaru sygnałów akustycznych w innej płaszczyźnie. Do tego celu niezbędne jest zastosowanie wielomikrofonowego układu pomiarowego, nazywanego matrycą mikrofonową (lub też szykiem mikrofonowym) i odpowiedniego algorytmu przetwarzania zmierzonych sygnałów. W beamformingu wykorzystywany jest fakt, że – z uwagi na stałą w danych warunkach prędkość dźwięku – dźwięk z danego punktu przestrzeni (lub płaszczyzny) do każdego z mikrofonów w matrycy mikrofonowej dociera z różnym opóźnieniem (lub inaczej: z przesunięciem fazowym), ze względu na różnice odległości [1, 4]. Zasadę działania beamformingu w uproszczonej formie jednowymiarowej przedstawiono na rys. 1. Założmy, że ma zostać wykonana mapa rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego dźwięku wytwarzanego przez pewne źródło, w płaszczyźnie w pobliżu tego źródła (w płaszczyźnie obrazowania). Wykonanie mapy wymaga podzielenia tej płaszczyzny na punkty (P1-P5) i wyznaczenia w każdym z nich wartości

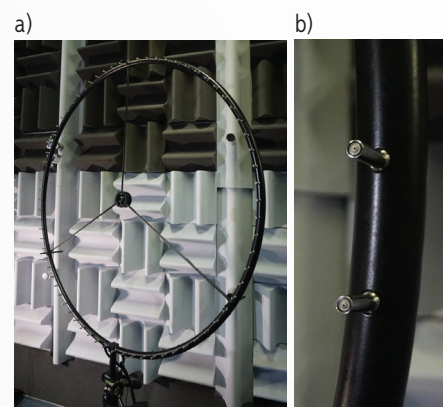
poziomów ciśnienia akustycznego. Każdy punkt płaszczyzny obrazowania znajduje się w innej odległości  $d_{ij}$  od każdego z mikrofonów matrycy mikrofonowej. Oznacza to, że dźwięk z danego punktu płaszczyzny obrazowania do każdego z mikrofonów dociera z innym opóźnieniem. Jeżeli sygnały elektryczne wychodzące z mikrofonów matrycy przesunie się względem siebie, aby wyrównać opóźnienia akustyczne w danym punkcie płaszczyzny obrazowania, a następnie się je zsumuje, nastąpi wzmocnienie sygnału docierającego do matrycy mikrofonowej z danego punktu płaszczyzny obrazowania. Można to zagadnienie porównać do tworzenia pewnej wiązki pomiarowej (ang. *beam*), skierowanej w wybrany punkt płaszczyzny obrazowania. W ten sposób matryca mikrofonowa tworzy pewien rodzaj anteny kierunkowej, za pomocą której można zbadać kolejno każdy punkt płaszczyzny obrazowania.



Rys. 1. Ilustracja zasady beamformingu (wyjaśnienie oznaczeń w tekście)

Fig. 1. Illustration of the beamforming principle (explanation of markings in the text)

Metoda sumowania i opóźniania sygnałów [4] jest podstawową i najprostszą metodą stosowaną w technice beamformingu. W praktyce zadanie kształtowania wiązki pomiarowej jest realizowane za pomocą określonego rodzaju filtra cyfrowego przetwarzającego sygnały pomiarowe z mikrofonów. Ten filtr jest nazywany beamformerem lub kreatorem wiązki, a samo przetwarzanie sygnałów może się odbywać zarówno w dziedzinie czasu, jak i w dziedzinie częstotliwości [1]. Na właściwości i możliwości obrazowania akustycznego, realizowanego techniką beamformingu, wpływa wiele czynników. Najważniejszymi są: kształt i rozmiar matrycy mikrofonowej, liczba mikrofonów i odległości pomiędzy nimi. Zasady leżące u podstaw beamformingu powodują również, że niektóre rodzaje sygnałów i zjawisk akustycznych są trudne do obrazowania tą techniką. Dotyczy to sygnałów wąskopasmowych, tonalnych, zwłaszcza gdy mamy do czynienia z sygnałami koherentnymi (spójnymi) wytwarzanymi przez różne źródła. Charakterystyka tworzonej w technice beamformingu wiązki pomiarowej również nie jest idealna, tzn. ma tzw. listki boczne, które mogą w mniejszym stopniu niż główna wiązka wzmacniać sygnały z innych punktów płaszczyzny pomiarowej.

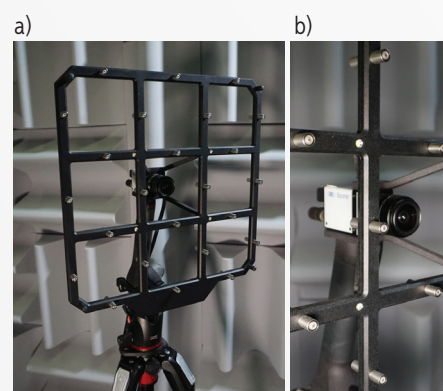


Rys. 2. Pierścieniowa matryca mikrofonowa (a) i mikrofony matrycy w zbliżeniu (b)

Fig. 2. Ring microphone array (a) and close-up of the array microphones (b)

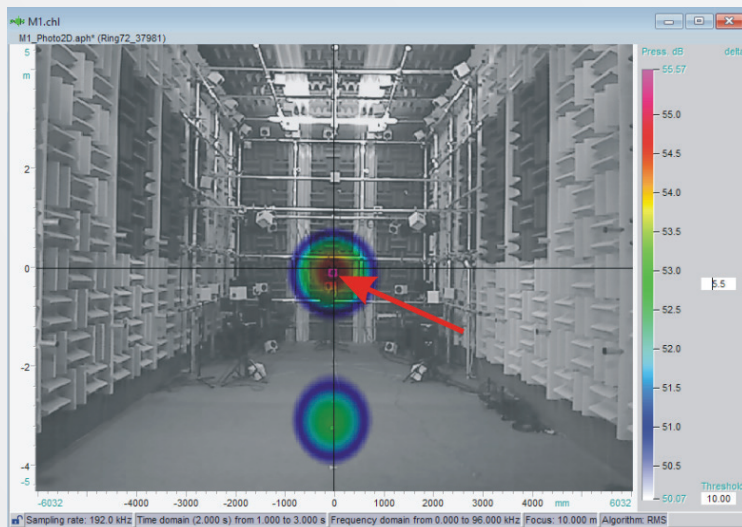
Przyczynia się to do powstawania (w niektórych sytuacjach) artefaktów (fałszywych obrazów, źródeł dźwięku) w wynikach obrazowania.

Urządzenia do obrazowania akustycznego z zastosowaniem techniki beamformingu są nazywane kamerami akustycznymi. Głównym elementem takiej kamery jest matryca mikrofonowa o określonym kształcie, pośrodku której zainstalowana jest kamera optyczna. Ta z kolei służy do uchwycenia obrazu badanego źródła dźwięku, na który potem zostanie nałożona mapa akustyczna. Pozostałe elementy kamery akustycznej to układ elektroniczny służący do rejestracji i przetwarzania sygnałów pomiarowych z matrycy mikrofonowej oraz odpowiednie oprogramowanie, za pomocą którego wykonywane są wizualizacje rozkładu parametrów pola akustycznego. Najczęściej spotyka się matryce pierścieniowe, w których mikrofony są rozmieszczone na okręgu o określonej średnicy (rys. 2.), oraz matryce prostokątne z mikrofonami rozmieszczonymi na wzorze siatki (rys. 3.). Występują również matryce z mikrofonami rozmieszczonymi spiralnie lub w inny sposób.



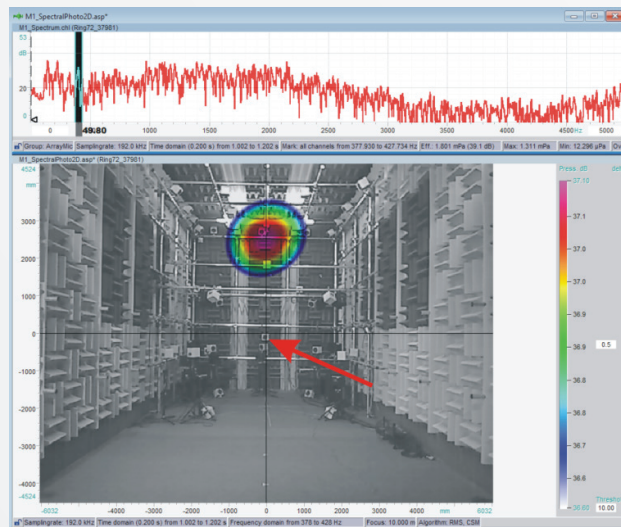
Rys. 3. Prostokątna, kratowa matryca mikrofonowa (a) i mikrofony matrycy w zbliżeniu (b) – widoczne pary mikrofonów skierowanych przeciwnie

Fig. 3. Rectangular, grid-type microphone array (a) and close-up of the array microphones (b) – pairs of microphones directed in the opposite direction are visible



Rys. 4. Wynik obrazowania akustycznego w przypadku głośnika emitującego szum różowy, umieszczonego w odległości 10 m od matrycy mikrofonowej kamery akustycznej (czerwona strzałka wskazuje położenie źródła dźwięku, a poniżej widoczne jest pozorne źródło dźwięku)

Fig. 4. Sound visualization result for a loudspeaker emitting pink noise, placed 10 m from the microphone array of the acoustic camera (red arrow indicates the position of the sound source, and below is the apparent sound source)



Rys. 5. Wynik obrazowania akustycznego w zakresie częstotliwości 378-428 Hz, w przypadku głośnika emitującego szum różowy, umieszczonego w odległości 10 m od matrycy mikrofonowej kamery akustycznej (czerwona strzałka wskazuje położenie źródła dźwięku, a powyżej widoczny jest obszar o najwyższym poziomie ciśnienia akustycznego)

Fig. 5. The result of the sound visualization in the frequency range 378-428 Hz, for a loudspeaker emitting pink noise, placed 10 m from the microphone array of the acoustic camera (the red arrow indicates the location of the sound source, and the area with the highest sound pressure level is visible above)

## Badania z wykorzystaniem urządzenia do obrazowania akustycznego

W badaniach wykorzystano kamerę akustyczną z matrycą mikrofonową, przedstawioną na rys. 2. Jest to matryca pierścieniowa o średnicy 140 cm, zawierająca 72 mikrofony pomiarowe (elektretowe). Kamera ma następujące parametry:

- zakres dynamiki mikrofonów pomiarowych: 28-130 dB (poziom dźwięku A)
- zalecane odległości pomiarowe (ogniskowa): > 0,5 m
- zalecany zakres mierzonych częstotliwości: od 200 Hz do 20 kHz
- zakres dynamiki mapy akustycznej: 9-12 dB (lub 20-40 dB w trybie HDR).

W centralnej części matrycy zamocowano kamerę optyczną z przetwornikiem 2 Mpix.

Dalej przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych za pomocą tej kamery akustycznej w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych. Badania w warunkach laboratoryjnych pozwoliły ocenić możliwości stosowanej kamery w obrazowaniu różnego rodzaju źródeł dźwięku, w tym wskazać problemy, jakie można napotkać w trakcie takich badań. Obserwacja w warunkach rzeczywistych stanowi przykład zastosowania kamery do identyfikacji źródeł cząstkowych hałasu wytwarzanego przez maszyny przemysłowe. Wynikiem obrazowania akustycznego jest tzw. zdjęcie akustyczne (wykonane dla określonego przedziału czasu sygnału akustycznego) lub zdjęcie widmowe (wykonane dla określonego przedziału częstotliwości sygnału akustycznego), obrazujące rozkład poziomu ciśnienia akustycznego na danej płaszczyźnie.

## Badania w warunkach laboratoryjnych

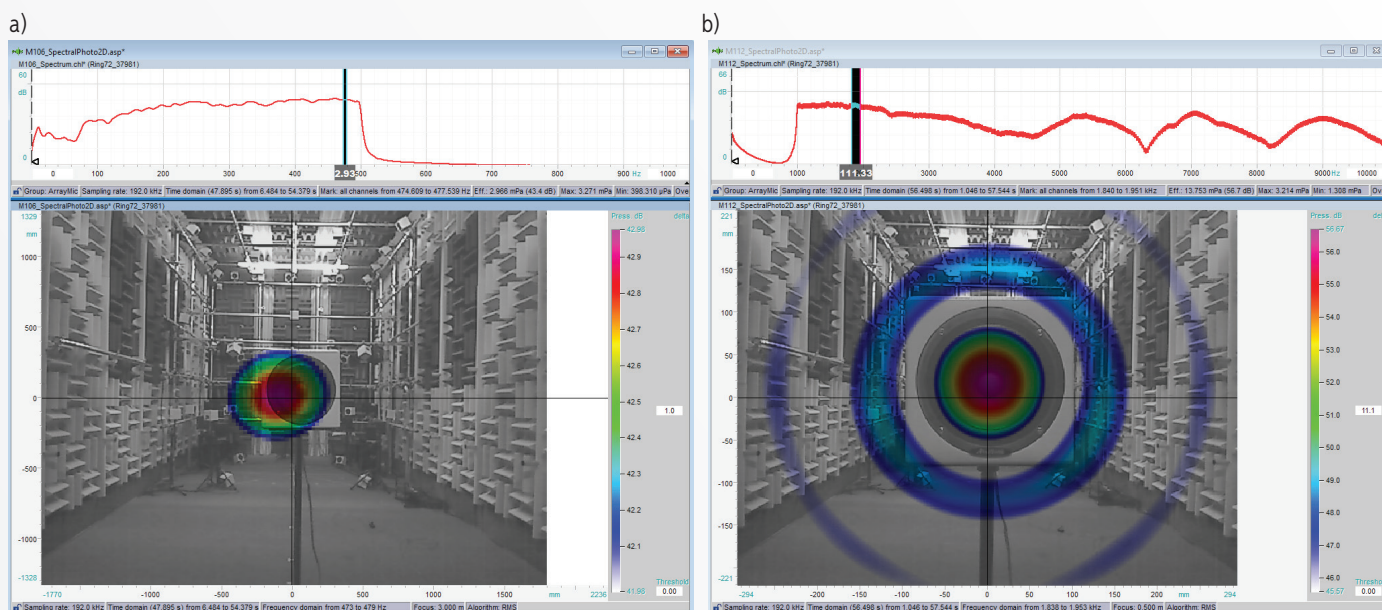
Badania w warunkach laboratoryjnych zostały przeprowadzone w komorze do badań akustycznych CIOP-PIB o dużej izolacyjności akustycznej i zapewniającej środowisko o krótkim czasie pogłosu (ograniczone odbicia dźwięku). Badania dotyczyły ściśle określonych źródeł dźwięku i sygnałów akustycznych. Ponieważ znane są dokładne położenia źródeł oraz przewidywany rozkład poziomu ciśnienia akustycznego wytwarzanego przez te źródła, można ocenić działanie kamery akustycznej. Skala barw na prezentowanych w artykule wizualizacjach (mapach rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego) odwzorowuje wybrany zakres poziomów ciśnienia akustycznego, począwszy od wartości najwyższej. Oznacza to, że na każdym wykresie (każdej mapie) skala barw reprezentuje inne wartości poziomów ciśnienia akustycznego. W kontekście rozważanych dalej zagadnień istotne są nie tyle wartości tych poziomów, co położenie obszarów barwnych reprezentujących najwyższe wartości poziomu ciśnienia akustycznego (intensywna czerwień i róż). W przypadku części z prezentowanych w artykule wizualizacji (nazywanych często nieformalnie „zdjęciami akustycznymi”) w górnej części okna znajduje się również wykres przedstawiający widmo FFT analizowanego sygnału akustycznego z zaznaczonym zakresem analizy częstotliwościowej.

Na rys. 4. przedstawiono mapę rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego, będącą wynikiem obrazowania w przypadku głośnika umieszczonego w odległości 10 m od matrycy mikrofonowej kamery akustycznej i generowania sygnału testowego, będącego szumem różowym.

Wynik obrazowania dokładnie wskazuje położenie źródła sygnału akustycznego (głośnika). Poniżej źródła właściwego, w obszarze podłogi komory, zlokalizowane jest źródło pozorne, będące wynikiem odbić fali akustycznej. Poziom ciśnienia akustycznego w miejscu lokalizacji źródła pozornego jest o ok. 4 dB niższy niż w przypadku źródła właściwego.

W przypadku rzeczywistych maszyn i urządzeń za emisję hałasu w różnych zakresach częstotliwości mogą odpowiadać różne elementy tych maszyn lub urządzeń, tworzące źródła cząstkowe hałasu. Mogą być one zwłaszcza źródłami hałasu wąskopasmowego, tonalnego. Ich identyfikacja wymaga oczywiście przeprowadzenia obrazowania akustycznego (analizy) hałasu w wybranych zakresach częstotliwości. Z tego względu w ramach testowych badań laboratoryjnych przeprowadzono wizualizację rozkładów poziomu ciśnienia akustycznego dla sygnałów wąskopasmowych oraz w wybranych zakresach częstotliwości. Na rys. 5. przedstawiono przykład wizualizacji wykonanej dla zakresu częstotliwości 378-428 Hz w przypadku głośnika umieszczonego tak jak poprzednio i emitującego sygnał będący szumem różowym. Można zauważyć, że wskazany przez wizualizację obszar o najwyższym poziomie ciśnienia akustycznego w ogóle nie pokrywa się z położeniem źródła hałasu. Jest to jeden z przykładowych problemów, jakie można napotkać podczas stosowania techniki obrazowania akustycznego dla sygnałów wąskopasmowych o niskiej częstotliwości.

Wyniki obrazowania dla wyższych zakresów częstotliwości i głośników umieszczonych w bliższej odległości od kamery akustycznej przedstawiono na rys. 6. Sygnałem testowym był w tym przypadku sygnał sinusoidalny o przemiatanej



Rys. 6. Wynik obrazowania akustycznego w przypadku: a) głośnika umieszczonego w odległości 3 m i zakresu częstotliwości 473-479 Hz, b) głośnika umieszczonego w odległości 0,5 m i zakresu częstotliwości 1838-1953 Hz

Fig. 6. Sound visualization results in the case of: a) a loudspeaker at a distance of 3 m with a frequency range of 473-479 Hz and, b) a loudspeaker at a distance of 0.5 m with a frequency range of 1838-1953 Hz

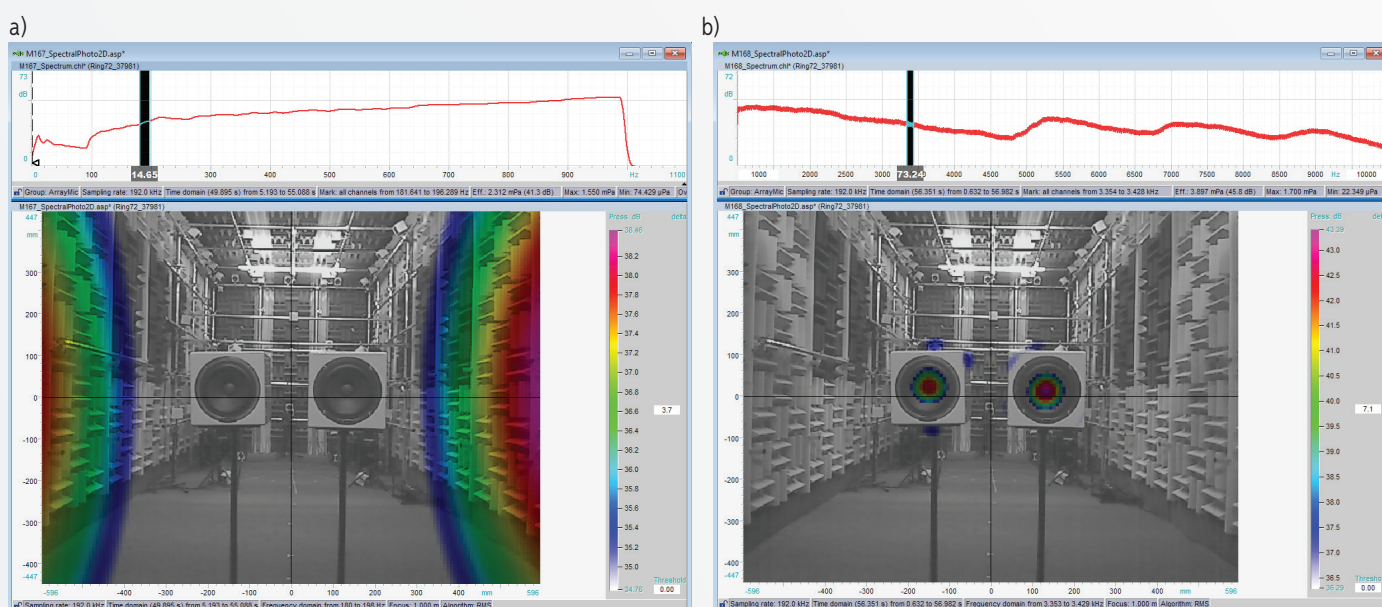
(zmienianej) częstotliwości. Można zauważyć, że w przypadku niższych wartości i wąskiego zakresu analizowanych częstotliwości obraz akustyczny nie pokrywa się dokładnie z położeniem źródła. Inaczej jest w przypadku częstotliwości wyższych (powyżej 1800 Hz), gdy obraz akustyczny pokrywa się dokładnie z położeniem membrany głośnika.

Na rys. 7. przedstawiono przykładowe wyniki obrazowania dla pary źródeł w postaci głośników umieszczonych w odległości 0,25 m od siebie i emitujących taki sam sygnał (sinusoidalny prze-

miatany) i w tej samej fazie (źródła koherentne). Wzajemne oddziaływanie wytwarzanych przez głośniki fal akustycznych powoduje, że przy niskich częstotliwościach (180-198 Hz) wyniki obrazowania wskazują błędnie na istnienie źródeł znajdujących się po bokach badanego obszaru. Przy wysokich częstotliwościach (powyżej 3300 Hz) wynik obrazowania pozwala już dokładnie zlokalizować położenie źródeł.

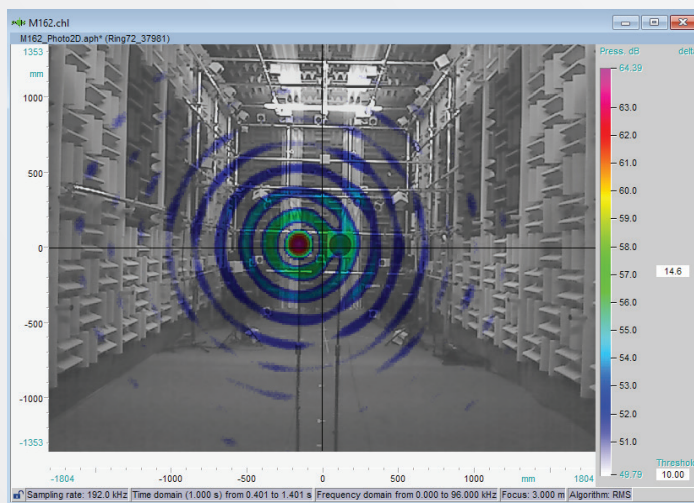
Ostatni z przykładowych wyników uzyskanych w ramach badań laboratoryjnych przedstawiono na rys. 8. W tym przypadku każdy z głośników

emitował sygnał tonalny o innej częstotliwości (3,1 kHz i 5 kHz). Jak można zauważyć, jeden z głośników jest źródłem dominującym (emituje dźwięk o wyższym poziomie ciśnienia akustycznego). Z tego względu identyfikacja i lokalizacja drugiego z głośników wymagała wykonania zdjęcia o dużej dynamice (dużym zakresie zobrazowanych poziomów ciśnienia akustycznego). Oba źródła lokalizowane są w sposób prawidłowy. Widoczne na zdjęciu okręgi wynikają z istnienia listków bocznych beamformera, co uwidacznia się na zdjęciach o dużej dynamice.



Rys. 7. Wynik obrazowania akustycznego w przypadku dwóch głośników pobudzanych tym samym sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości, znajdujących się w odległości 1 m od matrycy mikrofonowej, w przedziałach częstotliwości: a) 180-198 Hz, b) 3353-3429 Hz

Fig. 7. Sound visualization results for two loudspeakers driven by the same swept-frequency sine signal, located at a distance of 1 m from the microphone matrix, in the frequency ranges: a) 180-198 Hz, b) 3353-3429 Hz



Rys. 8. Wynik obrazowania akustycznego w przypadku dwóch głośników emitujących ton o częstotliwości 5 kHz (głośnik lewy) i ton o częstotliwości 3,1 kHz (głośnik prawy), znajdujących się w odległości 3 m od matrycy mikrofonowej

Fig. 8. Sound visualization result for two loudspeakers emitting a 5 kHz tone (left speaker) and a 3.1 kHz tone (right speaker), located 3 m from the microphone array



Rys. 9. Widok badanej frezarki CNC i matrycy mikrofonowej kamery akustycznej w punkcie pomiarowym

Fig. 9. View of the tested CNC milling machine and the acoustic camera microphone array at the measuring point

## Badania w warunkach rzeczywistych

Obiektem badań w warunkach rzeczywistych była frezarka CNC przeznaczona zwłaszcza do obróbki dużych elementów płaskich, takich jak płyty MDF. Ogólny wygląd tej frezarki wraz z matrycą kamery akustycznej w jednym z punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 9.

Do prawidłowego działania frezarka wymaga – oprócz sterownika – wielu innych urządzeń wspomagających, niezwiązanych bezpośrednio z jej konstrukcją, takich jak: pompa próżniowa (wytwarzająca podciśnienie służące do mocowania obrabianych elementów na stole frezarki, tzw. podsys), odciąg wiórów (do usuwania wiórów obrabianego materiału z okolic frezu), sprężarki (do wytwarzania sprężonego powietrza do chłodzenia frezu). Każdy z tych elementów może stanowić dodatkowe źródło hałasu podczas pracy frezarki. Na rys. 10. przedstawiono widmo FFT hałasu frezarki w przypadku, gdy włączony jest jedynie napęd jej wrzeciona, którego prędkość obrotowa wynosi 24 000 obr./min. W tym widmie widoczne są liczne składowe tonalne (harmoniczne)

o częstotliwościach wynikających z prędkości obrotowej wrzeciona.

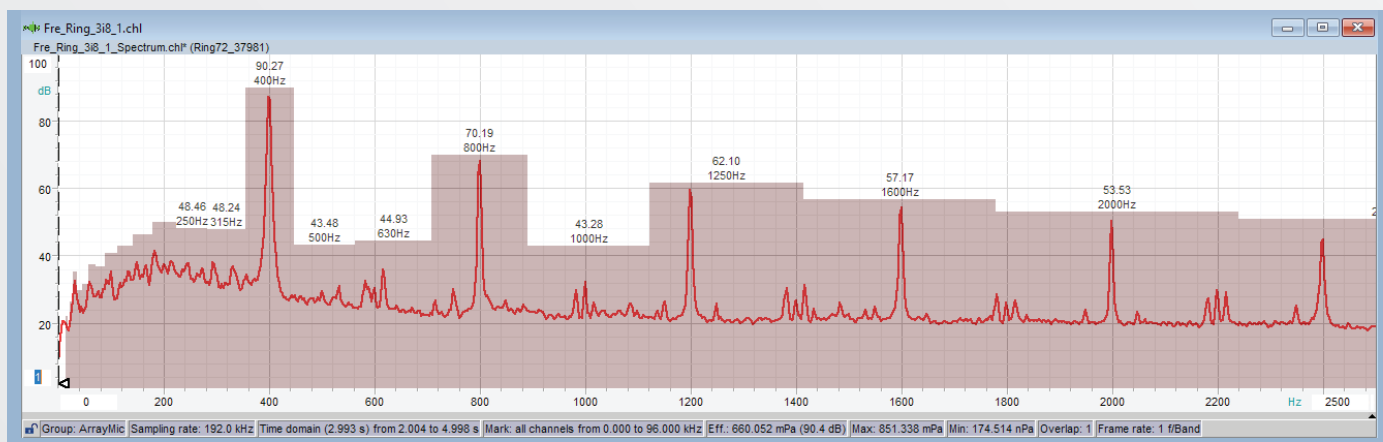
Na rys. 11. przedstawiono wyniki obrazowania akustycznego w pełnym zakresie analizowanych częstotliwości. Jak widać, w tym przypadku dominującym źródłem hałasu jest obudowa układu sterowania i mechanizmu posuwu pionowego wrzeciona (wzbudzana do drgań poprzez drgania napędu wrzeciona). W trakcie badań prowadzonych w pomieszczeniach często dochodzi do niekorzystnych zjawisk, związanych z odbiciami fali akustycznej od ścian pomieszczenia czy innych powierzchni odbijających dźwięk. Do matrycy mikrofonowej docierają wtedy zarówno bezpośrednia fala akustyczna, jak i fale odbite, co często powoduje, że dominujące źródło hałasu jest lokalizowane w sposób nieprawidłowy, w miejscu jednego ze źródeł pozornych. Dotyczy to zwłaszcza składowych wąskopasmowych hałasu (rys. 12.). Obraz „fałszywych” źródeł hałasu może powstawać również w przypadku, gdy w pomieszczeniu lub hali przemysłowej znajduje się wiele hałaśliwych maszyn lub urządzeń, zwłaszcza leżących poza płaszczyzną obrazowania i obszarem

obserwacji kamery optycznej. W szczególności dźwięk pochodzący ze źródeł hałasu znajdujących się z tyłu matrycy mikrofonowej może być na uzyskiwanych wizualizacjach interpretowany jako dźwięk pochodzący z źródeł znajdujących się przed matrycą. Z tego względu do interpretacji wyników obrazowania potrzebna jest znajomość otoczenia, w którym badania źródeł dźwięku były wykonywane.

Na rys. 13. przedstawiono przykładowy wynik obrazowania akustycznego hałasu powstającego w przypadku, gdy wrzeciono frezarki oraz wszystkie urządzenia wspomagające są włączone. Przeprowadzona wizualizacja dla wąskiego zakresu częstotliwości pokazała, że głównym źródłem hałasu o tej częstotliwości była sprężarka powietrza, znajdująca się pod stołem frezarki CNC.

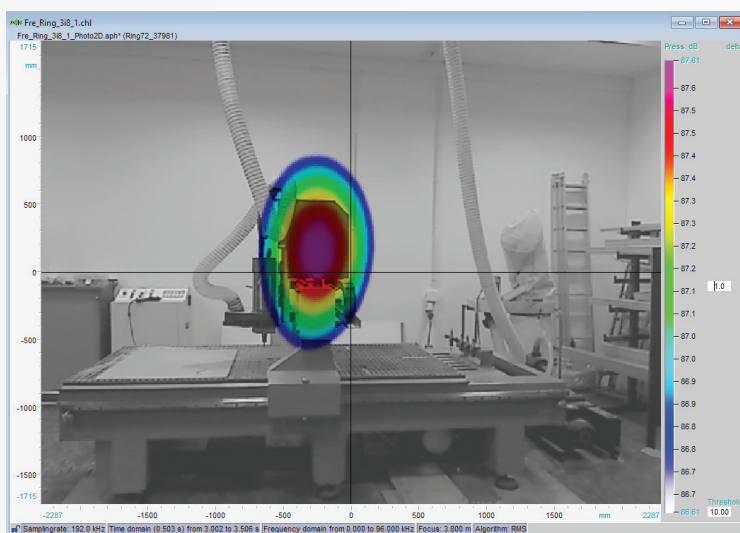
## Podsumowanie

Przedstawione w artykule wyniki badań potwierdzają, że techniki obrazowania akustycznego są znakomitym narzędziem do identyfikacji i oceny źródeł hałasu, które może wspomóc działania związane z ograniczaniem zagrożenia hałasem w środowisku



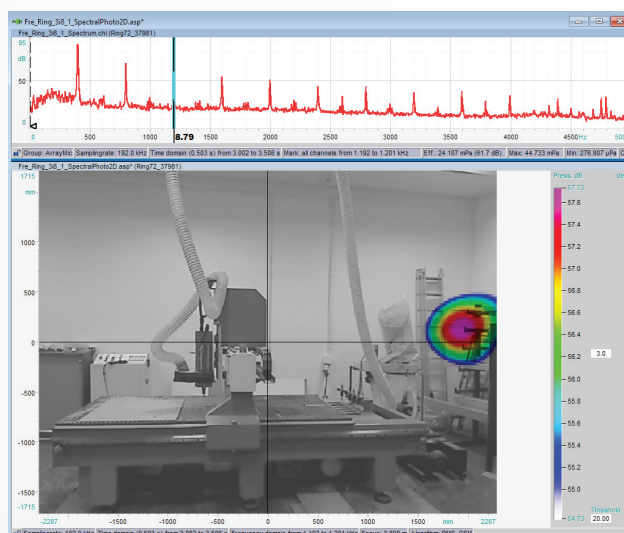
Rys. 10. Widmo FFT hałasu frezarki przy prędkości obrotowej wrzeciona wynoszącej 24 000 obr./min

Fig. 10. FFT spectrum of milling machine noise at a spindle speed of 24,000 rpm



Rys. 11. Wynik obrazowania akustycznego hałasu frezarki w pełnym zakresie częstotliwości hałasu słyszalnego (20 Hz – 20 kHz)

Fig. 11. Sound visualization of milling machine noise in the full frequency range of the audible noise (20 Hz – 20 kHz)



Rys. 12. Wynik obrazowania akustycznego hałasu frezarki w zakresie częstotliwości 1192-1201 Hz, obejmującym jedną ze składowych tonalnych hałasów

Fig. 12. Sound visualization of milling machine noise in the frequency range 1192-1201 Hz, including one of the tonal components of noise

pracy. Stosowanie tych metod wymaga jednak odpowiedniej wiedzy i doświadczenia, ponieważ w określonych warunkach akustycznych wyniki obrazowania akustycznego mogą prowadzić do błędnych wniosków dotyczących lokalizacji źródeł hałasu. Na podstawie zaprezentowanych tu wyników badań można stwierdzić, że w przypadku techniki beam-formingu ze szczególną uwagą należy podchodzić do badań źródeł hałasu o składowych tonalnych i źródeł koherentnych oraz badań w warunkach występowania odbić dźwięku i źródeł zakłócających, zlokalizowanych poza obszarem obrazowania. Ze względu na duże możliwości diagnostyczne warto jednak dążyć do jak najszerszego wykorzystania technicznych obrazowania akustycznego w praktyce

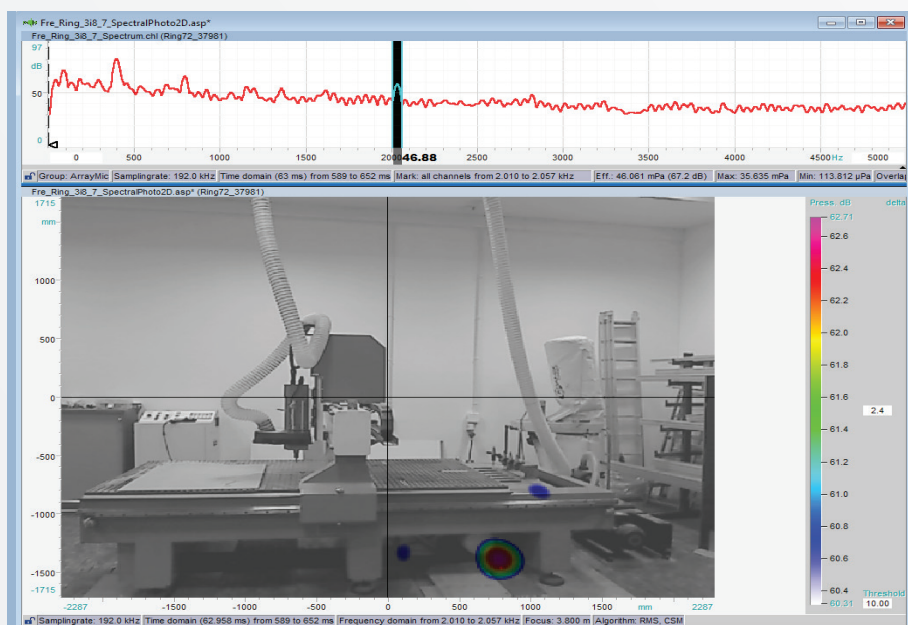
ograniczania zagrożeń hałasem. Zwłaszcza w przypadku złożonych maszyn lub obiektów przemysłowych, w których występuje wiele cząstkowych źródeł hałasu, techniki obrazowania akustycznego pozwalają na wskazanie źródeł dominujących, gdzie zastosowanie odpowiednich środków technicznych, ograniczających hałas, doprowadzi do najlepszych efektów globalnych. W praktycznym wykorzystaniu techniki obrazowania akustycznego może pomóc metodyka badań z użyciem urządzeń do obrazowania akustycznego, będąca przedmiotem prac prowadzonych w CIOP-PIB. Ta metodyka wspomaga dobór techniki obrazowania akustycznego do cech badanego źródła hałasu, a ponadto zawiera wskazówki odnośnie do procesu badań i analizy wyników.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] KIM, Y.-H., CHOI, J.-W. Sound Visualization and Manipulation. Singapore: John Wiley & Sons, 2013.
- [2] SZCZEPAŃSKI, G. Sound Field Visualization in Noise Hazard Control. [In:] D. Pleban (ed.), Occupational Noise and Workplace Acoustics: Advances in Measurement and Assessment Techniques. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2021.
- [3] KORADECKA, D. (red.). Bezpieczeństwo i higiena pracy. Warszawa: CIOP-PIB, 2008.
- [4] TUMA, J., et al. Sound Source Localisation. Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Carpathian Control Conference (ICCC), 28-31 May 2012, High Tatras, Slovakia, IEEE, 2012.
- [5] FIEBIG, W. Drgania i hałas w inżynierii maszyn. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019.
- [6] SZCZEPAŃSKI, G., MORZYŃSKI, L., PLEBAN, D. Mobilne stanowisko do wizualizacji pola akustycznego wokół maszyn. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka. 2019, 5(572): 16-20.
- [7] STRAMBERSKY, R., PAVELKA, V., PAWLENKA, T., SURANEK, P., MORZYŃSKI, L. Congregation unit reduction by its case. MM Science Journal. 2021: 4501-4504.
- [8] FIEBIG, W., DĄBROWSKI, D. Use of acoustic camera for noise sources localization and noise reduction in the industrial plant. Archives of Acoustics. 2020, 45(1): 111-117.

*Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020-2022 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (projekt nr II.BP.20 pt. „Techniki obrazowania akustycznego w zwalczaniu zagrożeń akustycznych”).*

*Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*



Rys. 13. Wynik obrazowania akustycznego hałasu frezarki w wybranym zakresie częstotliwości (2010-2057 Hz), w którym dominującym źródłem hałasu jest sprężarka umieszczona pod stołem frezarki

Fig. 13. Sound visualization of the milling machine noise in the selected frequency range (2010-2057 Hz), in which the dominant noise source is the compressor located under the milling machine table