

mgr inż. GRZEGORZ SZCZEPAŃSKI (ORCID: 0000-0003-0390-1624)

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

dr hab. inż. DARIUSZ PLEBAN, prof. CIOP-PIB (ORCID: 0000-0003-1351-9584)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: [grszc@ciop.pl](mailto:grszc@ciop.pl)

DOI: 10.5604/01.3001.0013.1977

# Mobilne stanowisko do wizualizacji pola akustycznego wokół maszyn

Wizualizacja parametrów pola akustycznego to stosunkowo nowa metoda badawcza, która umożliwia zobrazowanie parametrów charakteryzujących pole akustyczne w konkretnych punktach przestrzeni w pobliżu maszyny. Obrazy uzyskane w ten sposób mogą mieć duże zastosowanie w analizie prototypowych urządzeń, budownictwie, a także w analizie pola akustycznego wokół maszyn przemysłowych. W artykule opisano sposób działania przykładowego, mobilnego stanowiska, wizualizującego pole akustyczne wokół maszyn. Omówiono również wyniki przeprowadzonych badań emisji hałasu na przykładzie zestawu głośnikowego i pompy próżniowej.

*Słowa kluczowe: emisja hałasu, natężenie dźwięku, zagrożenia wibroakustyczne, system pomiarowy*

## Mobile test setup for visualization of acoustic fields surrounding machines

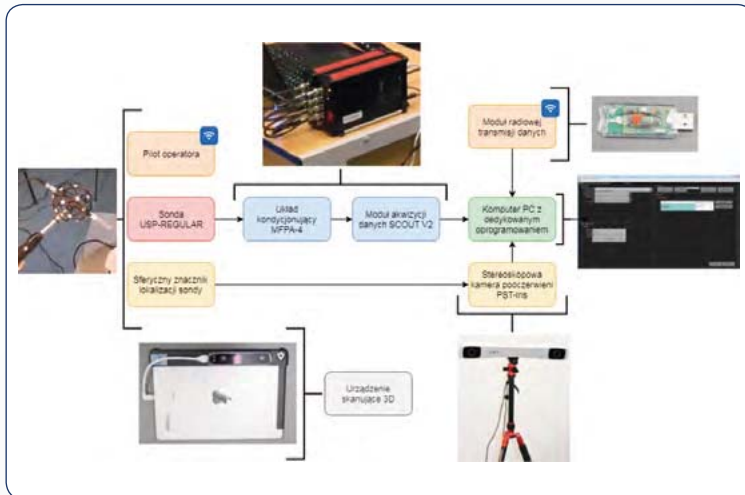
Visualization of the parameters of acoustic field is a relatively new research technique that allows for illustrate the parameters characterizing the acoustic field for specific points of space near the machine. Images obtained in this way have many applications in the analysis of prototype devices, construction, as well as in the analysis of the acoustic field around industrial machines. The article presents the principles of operation of the mobile experimental setup. The results of studies of noise emission on the example of loudspeaker set and vacuum pump are also discussed.

*Keywords: noise emission, sound intensity, vibroacoustic hazards, measuring system*

## Wstęp

Podstawowym i najskuteczniejszym środkiem ochrony przed hałasem jest eliminacja zagrożenia u jego źródła [1]. W przypadku hałasu pochodzącego z urządzeń i maszyn przemysłowych, badania emisji hałasu niezwykle rzadko dokonywane są na etapie symulacji numerycznych, ponieważ realizuje się je raczej w fazie konstrukcji prototypowych rozwiązań. Emisja hałasu może być charakteryzowana przez szereg parametrów, określanych za pomocą znormalizowanych metod. Bazowymi parametrami są poziom mocy akustycznej skorygowany charakterystyką częstotliwościową A oraz poziom ciśnienia akustycznego emisji skorygowany charakterystyką częstotliwościową A na stanowisku pracy lub w innych określonych miejscach [2]. Nie pozwalają one jednak projektantom i konstruktorom na dopracowanie elementów konstrukcji maszyn, jako że są jedynie informacją na temat energii akustycznej.

Zupełnie inny rodzaj informacji niosą ze sobą ilustracje, przedstawiające zwizualizowaną wartość parametrów dźwięku w ściśle określonych punktach przestrzeni w pobliżu źródeł hałasu [3]. Pozwalają one m.in. na określenie pierwotnych źródeł emisji hałasu maszyny, dając szereg szczegółowych i przydatnych informacji. Powszechnie wykorzystywane systemy do wizualizacji pola akustycznego, za podstawę przyjmują pomiar ciśnienia akustycznego i są wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu [4-6]. Są to matryce wielomikrofonowe, przeznaczone do rejestracji ciśnienia akustycznego w polu dalekim, gdzie sygnał jest przekształcany z wykorzystaniem techniki kształtowania wiązki, tzw. beamformingu [7]. Ciśnienie akustyczne jest wielkością skalarną, przez co technika ta jest silnie podatna na odbicia fal dźwiękowych, obecność dodatkowych źródeł hałasu i niedokładna



Rys. 1. Schemat blokowy mobilnego stanowiska  
Rys. 1. Block diagram of mobile test setup

w ocenie kierunkowości promieniowania dźwięku oraz w lokalizacji źródeł pierwotnych.

Celem artykułu jest przedstawienie metody wizualizacji parametrów pola akustycznego, bazującej na bezpośrednim pomiarze prędkości akustycznej (zwanej również prędkością cząstek, tj. prędkością drgań cząstki w polu fali dźwiękowej [8]), przez co pomiary te mogą być wykonywane również w polu bliskim [9]. Umożliwia to identyfikację źródeł pierwotnych, co może mieć kluczowe znaczenie w ocenie projektowanych, modernizowanych lub istniejących maszyn, urządzeń i zabezpieczeń przeciwhałasowych.

## Mobilne stanowisko

Badania emisji hałasu maszyn i urządzeń są pierwszym krokiem do identyfikacji i minimalizacji zagrożenia hałasem. Do realizacji badań mających na celu określenie źródeł emisji Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy posiada specjalistyczne mobilne stanowisko badawcze do wizualizacji pola akustycznego wokół maszyn i urządzeń z wykorzystaniem pomiaru prędkości akustycznej w polu bliskim (zwane w dalszej części artykułu mobilnym stanowiskiem). Schemat blokowy mobilnego stanowiska przedstawiono na rys. 1.

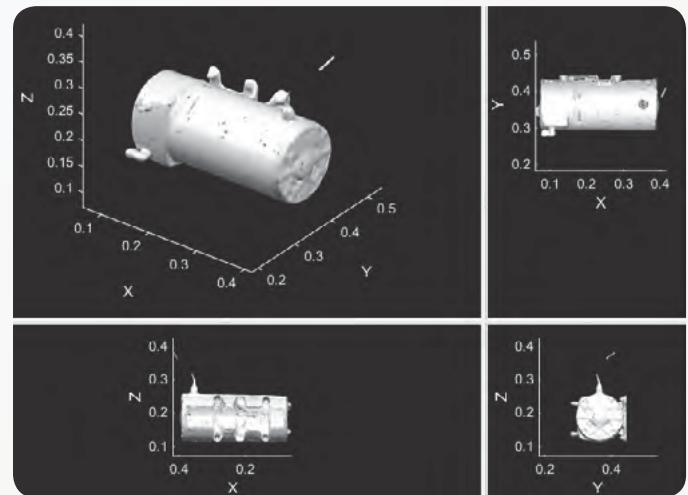
Pierwszym krokiem do uzyskania wizualizacji pola akustycznego jest utworzenie modelu bryłowego badanego obiektu. Można tego dokonać importując do oprogramowania mobilnego stanowiska plik CAD lub też utworzyć go bezpośrednio poprzez wykorzystanie skanera 3D. Stanowisko wyposażone jest w urządzenie skanujące 3D w postaci tabletu z nakładką optyczną do skanowania powierzchni, dzięki czemu w krótkim czasie uzyskuje się model bryłowy o jakości pozwalającej na prawidłowe wykonanie pomiarów (rys. 2.).

Pomiar parametrów pola akustycznego wykonywany jest z wykorzystaniem sondy, która pozwala na pomiar prędkości aku-

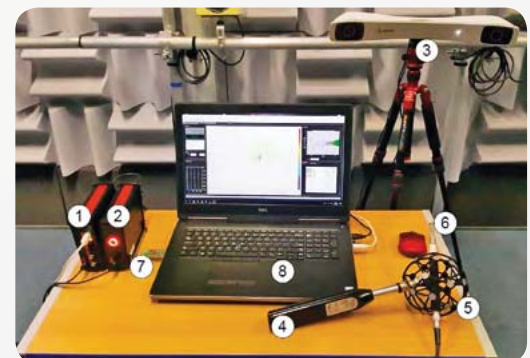
stycznej w trzech kierunkach oraz pomiar poziomu ciśnienia akustycznego, co umożliwia wyznaczenie poziomu natężenia dźwięku w określonych punktach przestrzeni. Umożliwia to identyfikację pierwotnych źródeł hałasu i ocenę kierunkowości promieniowania. W skład mobilnego stanowiska wchodzi również układ kondycjonujący oraz moduł akwizycji danych. Układ kondycjonujący jest za zapewnienie zasilania dla sondy oraz dopasowanie poziomu sygnału wejściowego do zakresu przetworników analogowo-cyfrowych. Przetwarzanie sygnałów do postaci cyfrowej dokonywane jest natomiast w module akwizycji danych, który odpowiedzialny jest również za ich późniejszą transmisję do komputera.

Ważnym elementem stanowiska jest stereoskopowa kamera podczerwieni, która wykorzystywana jest do lokalizacji sferycznego znacznika, zainstalowanego na pilocie operatora, co pozwala na śledzenie trajektorii ruchu sondy. Śledzenie położenia sondy realizowane jest po wcześniejszym przeprowadzeniu procesu dopasowania modelu. Procedura dopasowania obejmuje wyznaczenie pewnej liczby punktów na modelu bryłowym (komputerowym) oraz wskazanie tych samych punktów na modelu rzeczywistym. Procedura dopasowania decyduje o dokładności przyporządkowania pomiaru do określonego punktu przestrzeni. Wyznaczanie hologramu akustycznego prędkości akustycznej, ciśnienia akustycznego oraz natężenia dźwięku jest z kolei możliwe dzięki specjalnej procedurze badawczej, w której wykorzystano metodę skaningową<sup>1</sup>. W opracowanej w CIOP-PIB procedurze badawczej opisane zostały wszystkie czynności przygotowawcze (w tym m.in.

<sup>1</sup> Metoda skaningowa – polegająca na przesuwaniu sondy po torach meandrowych w dwóch kierunkach wzajemnie prostopadłych, utrzymując przy tym stałe tempo przemieszczania sondy oraz równomierną gęstość linii przemieszczania w ramach badanej powierzchni.



Rys. 2. Widok zeskanowanej pompy próżniowej użytej do badań  
Rys. 2. View of the scanned vacuum pump used in studies



Fot. 1. Widok stanowiska: 1 – moduł akwizycji danych, 2 – układ kondycjonujący, 3 – stereoskopowa kamera podczerwieni, 4 – pilot operatora, 5 – sferyczny znacznik lokalizacji sondy, 6 – sonda, 7 – moduł radiowej transmisji danych, 8 – komputer z dedykowanym oprogramowaniem

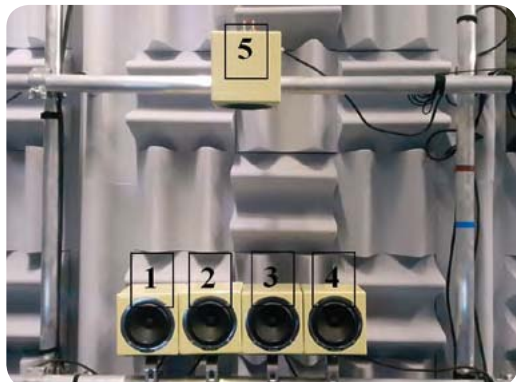
Fot. 1. View of the test setup: 1 – data acquisition module, 2 – conditioning module, 3 – optical tracking camera, 4 – remote handle, 5 – tracking sphere marker, 6 – probe, 7 – radio data transmission module, 8 – computer with appropriate software

wykonanie pomiarów przepływów powietrza, zakłóceń elektromagnetycznych i temperatury), sposoby przygotowania modelu numerycznego, kalibracja sprzętu, jak i tok postępowania przy wyznaczaniu m.in. hologramu akustycznego oraz karta pomiarów procedury badawczej.

## Pomiary przykładowych obiektów

Pierwszym obiektem badań weryfikacyjnych procedury badawczej, dla którego sprawdzono poprawność wskazania źródła emisji hałasu był zestaw czterech głośników w obudowach z wymuszeniem o charakterze tonalnym oraz jednego głośnika w obudowie z wymuszeniem o charakterze szumu białego. Badania przeprowadzono w komorze do badań akustycznych w laboratoriach Tech-Safe-Bio Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego. Widok stanowiska z systemem pomiarowym przedstawiono na fot. 1.

Badania przeprowadzone zostały w akustycznym polu bliskim, w płaszczyźnie równoległej do głośników, w odległości około 1-2 cm od ich obudowy. Widok zestawu głośników w obudowie, przygotowanych do badań testowych, przedstawiono na fot. 2. Parametry zadanych sygnałów wymuszających zawarte zostały w tabeli.



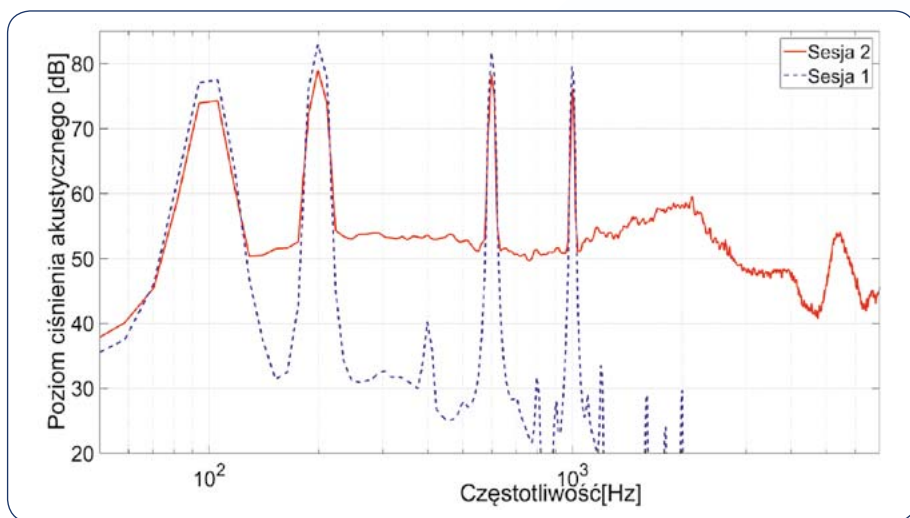
Fot. 2. Widok zestawu głośników w obudowie użytych w badaniach  
Fot. 2. View of speakers set used in studies

Tabela. Parametry sygnałów wymuszających użytych w badaniu testowym

Table. Parameters of the signals used in the studies

Numer głośnika	Częstotliwość wymuszenia [w Hz]	Poziom ciśnienia akustycznego w punkcie oddalonym o około 5 cm w osi membrany głośnika (w dB)
1	200	81,2
2	600	82,7
3	1000	83,5
4	100	80,1
5	Szum biały	91,4

Poziom ciśnienia akustycznego szumu białego, (przy wyłączonych sygnałach głośników 1-4), w odległości ok. 1 cm od membran tych głośników, wynosił od 75,4 do 77,1 dB. Pomiar poziomu ciśnienia akustycznego oraz prędkości akustycznej w trzech kierunkach z wykorzystaniem mobilnego stanowiska obejmowały dwie sesje pomiarowe o łącznym czasie trwania ok. 30 minut, w tym: pierwsza sesja trwająca ok. 10 minut, wykonana przy wyłączonym głośniku nr 5 i działających głośnikach 1-4; druga sesja trwająca ok. 20 minut z wszystkimi głośnikami włączonymi. Wprowadzenie głośnika nr 5 pozwoliło imitować zakłócenie i sprawdzić poprawność wskazania lokalnych źródeł emisji hałasu dla poszczególnych częstotliwości. Model bryłowy zestawu głośnikowego utworzono za pomocą urządzenia skanującego 3D. Procedura dopasowania zrealizowana została na podstawie 10 punktów, a błąd dopasowania wyniósł 9,8% i jest to wartość mieszcząca się w granicy błędów określonej w procedurze. Wyznaczono widmo poziomu ciśnienia akustycznego w odniesieniu do obydwu sesji. Wynik przedstawiono na rys. 3.

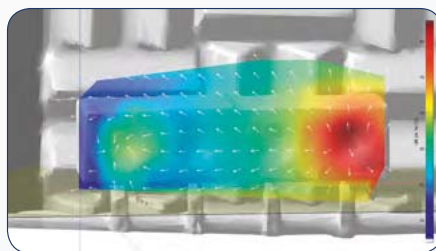


Rys. 3. Widmo sygnału analizowanego w badaniu testowym, z podziałem na sesje (Sesja 1 – sesja pomiarowa pierwsza, zrealizowana wyłącznie przy włączonych głośnikach o numerach od 1 do 4, Sesja 2 – sesja pomiarowa druga, zrealizowana przy włączonych głośnikach o numerach od 1 do 5)

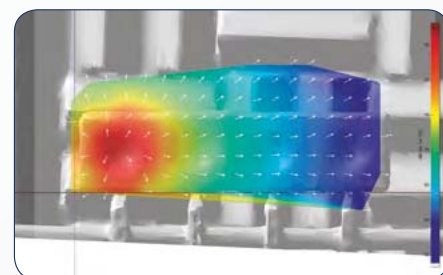
Rys. 3. The spectrum of the signal of the test study, divided into sessions (Session 1 - first measurement session, carried out only with loudspeakers from 1 to 4, Session 2 - second measurement session, carried out with loudspeakers from 1 to 5)

Na podstawie przedstawionej analizy częstotliwościowej, zarówno w pierwszej, jak i drugiej sesji pomiarowej wyraźnie rozróżnić można maksima dla częstotliwości 100, 200, 600 i 1000 Hz. Dla zadanych wartości częstotliwości (częstotliwości wymuszeń głośnika) sporządzono wizualizacje poziomu natężenia dźwięku w otoczeniu głośników 1-4 dla sesji 1 (rys. 4.-7.) oraz w otoczeniu głośników 1-5 dla sesji 2 (rys. 8.). Wizualizacje sporządzono dla szerokości siatki wynoszącej 40 mm (szerokość ta odpowiada długości boku prostopadłościanu w objętości którego uśredniane są wyniki pomiarów: im mniejsza, tym lepsza rozdzielczość przestrzenna otrzymanych wyników). Kolorem czerwonym oznaczone zostały obszary o największych wartościach poziomu natężenia dźwięku.

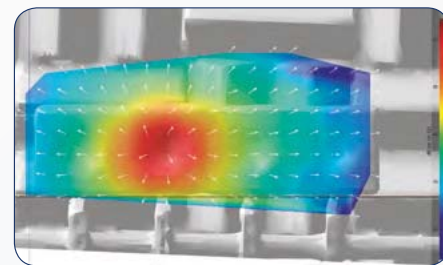
Przedstawione wizualizacje sporządzone zostały wyłącznie przy włączonych wymuszeniach dla głośników 1-4. Wyniki pomiarów wykazują, że możliwa jest lokalizacja źródeł emisji znajdujących się blisko siebie, charakteryzujących się różną składową dominującą. Przedstawiono tu wyniki pomiarów tych samych wymuszeń, ale z włączonym głośnikiem nr 5., który imituje zakłócenie.



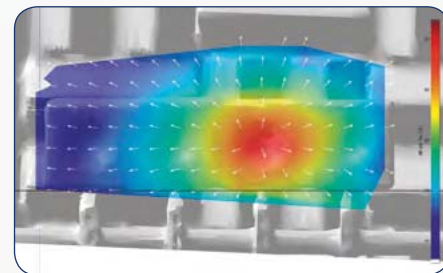
Rys. 4. Wizualizacje poziomu natężenia dźwięku w otoczeniu głośników 1-4 w płaszczyźnie XZ – częstotliwość 100 Hz  
Rys. 4. Visualizations of the sound intensity level around the speakers 1-4 in XZ plane – frequency 100 Hz



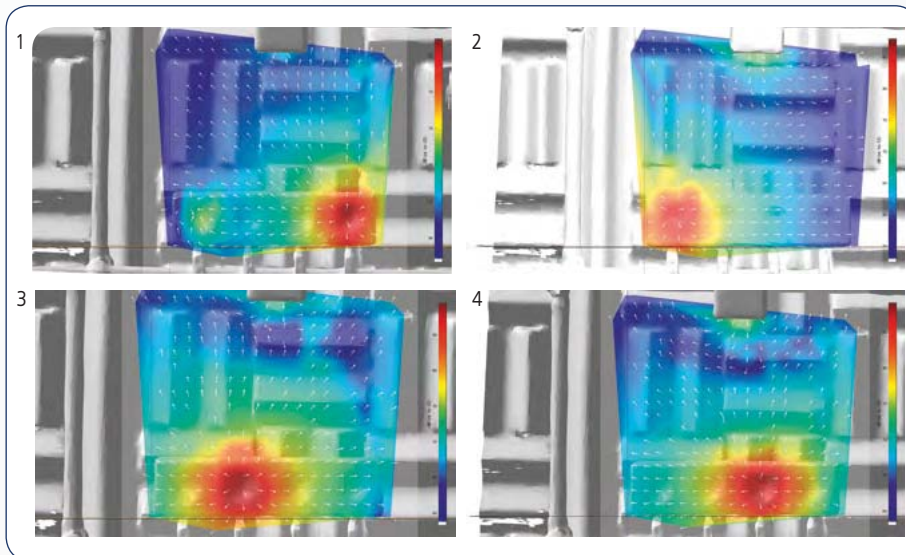
Rys. 5. Wizualizacje poziomu natężenia dźwięku w otoczeniu głośników 1-4 w płaszczyźnie XZ – częstotliwość 200 Hz  
Rys. 5. Visualizations of the sound intensity level around the speakers 1-4 in XZ plane – frequency 200 Hz



Rys. 6. Wizualizacje poziomu natężenia dźwięku w otoczeniu głośników 1-4 w płaszczyźnie XZ – częstotliwość 600 Hz  
Rys. 6. Visualizations of the sound intensity level around the speakers 1-4 in XZ plane – frequency 600 Hz

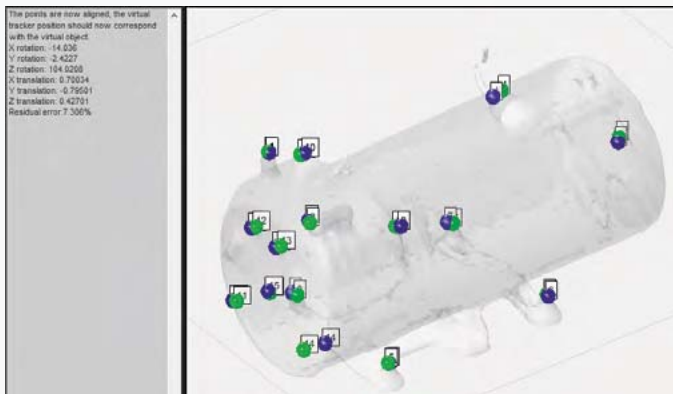


Rys. 7. Wizualizacje poziomu natężenia dźwięku w otoczeniu głośników 1-4 w płaszczyźnie XZ – częstotliwość 1000 Hz  
Rys. 7. Visualizations of the sound intensity level around the speakers 1-4 in XZ plane – frequency 1000 Hz



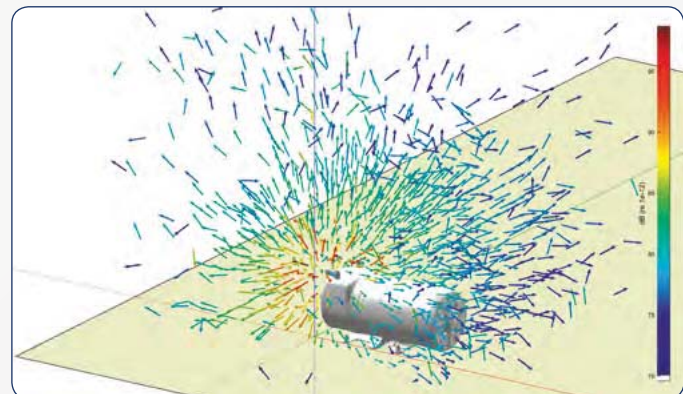
Rys. 8. Wizualizacje poziomu natężenia dźwięku w otoczeniu głośników 1-5., w płaszczyźnie XZ – częstotliwości to odpowiednio: pkt 1-100 Hz, pkt 2-200 Hz, pkt 3-600 Hz, pkt 4-1000 Hz)

Rys. 8. Visualizations of the sound intensity level around the speakers 1-5 in XZ plane – frequencies: pt.1-100 Hz, pt.2-200 Hz, pt.3-600 Hz, pt.4-1000 Hz)



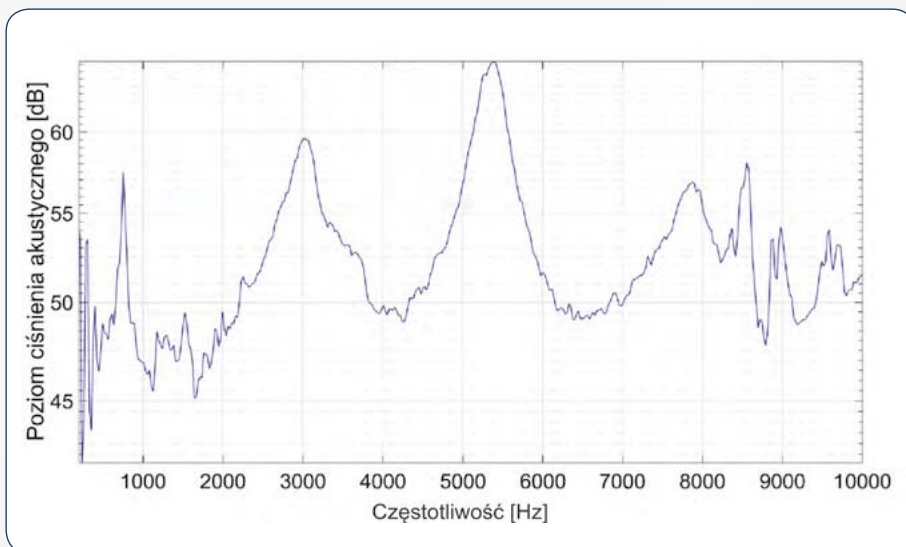
Rys. 9. Okno procesu procedury dopasowania dla modelu pompy próżniowej (niebieskie – pozycje modelu wirtualnego, zielone – pozycje rzeczywiste)

Rys. 9. The window of position identification procedure in vacuum pump model (blue – virtual track position, green – real position)



Rys. 10. Wektorowy rozkład poziomu natężenia dźwięku w otoczeniu pompy próżniowej

Rys. 10. Vector distribution of the sound intensity level around the near vacuum pump



Rys. 11. Widmo badanego sygnału pompy próżniowej

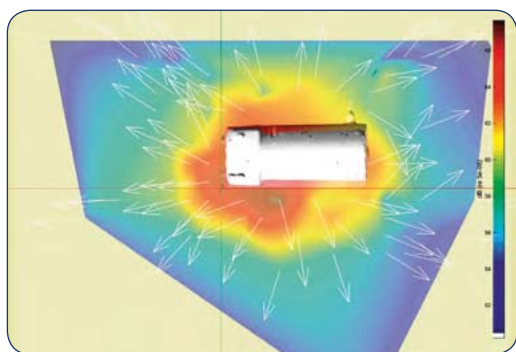
Rys. 11. The spectrum of the tested signal of the vacuum pump

Z przedstawionych wizualizacji wynika, że obecność źródła zakłócającego w postaci głośnika z wymuszeniem szumem białym nie wpłynęła na wynik lokalizacji źródeł hałasu o wymuszeniu tonalnym. Źródła emisji oraz kierunek propagacji fali dla tej płaszczyzny pokrywają się z rzeczywistym położeniem głośników. Z uwagi, że w danych przypadkach udział składowej tonalnej w wymuszeniu głośnika nr 5 jest niski to wizualizacja nie wskazuje go jako źródła głównego. Można zauważyć jednak wektory natężenia skierowane od głośnika 5, jest to szczególnie widoczne dla częstotliwości 1000 Hz.

Drugim obiektem badań była emisja hałasu pompy próżniowej łopatkowej bezolejowej, stosowanej głównie przy stołach podciśnieniowych, przy produkcji szyb, jak również w przemyśle jubilerskim. Badana pompa została umieszczona na powierzchni odbijającej. Proces dopasowania modelu zrealizowany został w oparciu o 15 punktów, a błąd dopasowania wyniósł 7,3% (widok ekranu procedury dopasowania przedstawiono na rys. 9.).

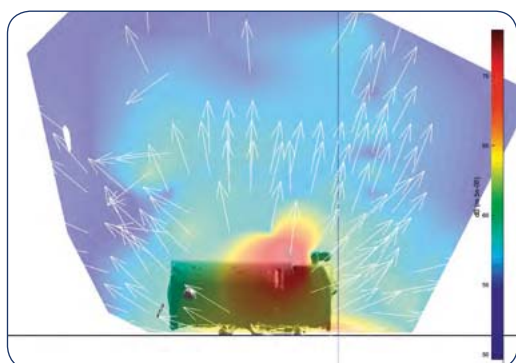
Sesja pomiarowa trwała łącznie 24 minuty i 40 sekund. Sonda prowadzona była w różnych odległościach, tj. od kilku milimetrów, aż do około 40 cm od powierzchni badanego obiektu. Wizualizacje sporządzono dla szerokości siatki wynoszącej 40 mm. Na rys. 10. przedstawiono główne okno wizualizacji poziomu natężenia w postaci rozkładu wektorowego 3D.

Na przedstawionej wizualizacji obszary o najwyższym poziomie natężenia dźwięku w sposób uporządkowany ukierunkowane są od zaworu pompy. Hałas jest więc prawdopodobnie pochodzenia aerodynamicznego. W ramach sprawdzenia warunków pomiaru wykonano badania przepływu dookoła pompy próżniowej. W pobliżu zaworu występował przepływ wynoszący ok. 4 m/s. Badania zostały przeprowadzone bez osłony przeciwwietrznej, dlatego też usunięto te wyniki pomiarów,



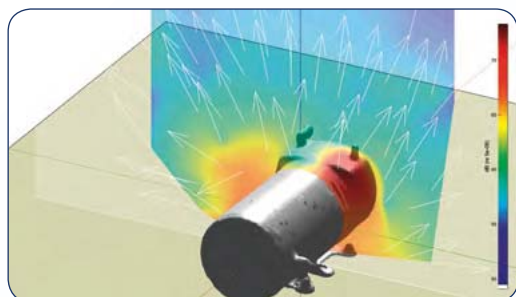
Rys. 12. Rozkład pola wektorowego prędkości akustycznej wokół pompy próżniowej w płaszczyźnie XY – częstotliwość 750 Hz

*Rys. 12. Distribution of acoustic particle velocity vector field around the vacuum pump in XY plane – frequency 750 Hz*



Rys. 13. Rozkład pola wektorowego prędkości akustycznej wokół pompy próżniowej w płaszczyźnie XZ – częstotliwość 750 Hz

*Rys. 13. Distribution of acoustic particle velocity vector field around the vacuum pump in XZ plane – frequency 750 Hz*

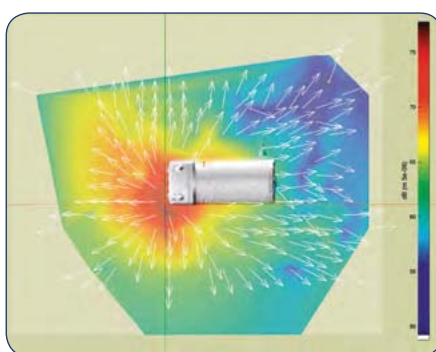


Rys. 14. Rozkład pola wektorowego prędkości akustycznej wokół pompy próżniowej w płaszczyźnie YZ, widok izometryczny – częstotliwość 750 Hz

*Rys. 14. Distribution of acoustic particle velocity vector field around the vacuum pump in isometric view – frequency 750 Hz*

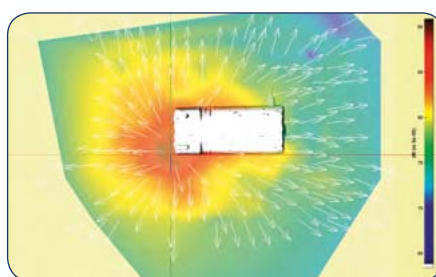
w których przepływ powietrza wynosił powyżej 1 m/s. Maksymalny poziom natężenia dźwięku przed korektą wynosił 100,4 dB, a po usunięciu błędnych wyników pomiaru – 94,5 dB. W celu określenia składowych dominujących w widmie sygnału wykonano analizę częstotliwościową poziomu ciśnienia akustycznego. Wyniki tej analizy przedstawiono na rys. 11.

Z wykresu wytypowano cztery maksima o częstotliwościach: 750 Hz, 3000 Hz, 5300 Hz i 7800 Hz, dla których sporządzono wizualizację rozkładu pola wektorowego prędkości akustycznej. Na rys. 12.-14. przedstawiono



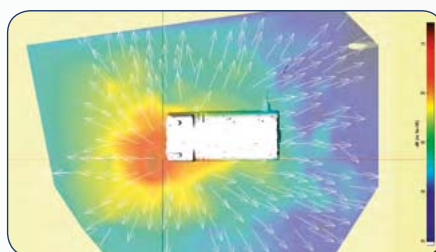
Rys. 15. Rozkład pola wektorowego prędkości akustycznej wokół pompy próżniowej w płaszczyźnie XY – częstotliwość 3000 Hz

*Rys. 15. Distribution of acoustic particle velocity vector field around the vacuum pump in XY plane – frequency 3000 Hz*



Rys. 16. Rozkład pola wektorowego prędkości akustycznej wokół pompy próżniowej w płaszczyźnie XY – częstotliwość 5300 Hz

*Rys. 16. Distribution of acoustic particle velocity vector field around the vacuum pump in XY plane – frequency 5300 Hz*



Rys. 17. Rozkład pola wektorowego prędkości akustycznej wokół pompy próżniowej w płaszczyźnie XY – częstotliwość 7800 Hz

*Rys. 17. Distribution of acoustic particle velocity vector field around the vacuum pump in XY plane – frequency 7800 Hz*

wizualizacje w różnych płaszczyznach pomiarowych dla częstotliwości 750 Hz.

Wyniki przedstawione na rys. 12.-14. wskazują na możliwość powiązania źródła powstania hałasu 750 Hz z konkretną częścią pompy próżniowej. Główne źródło emisji, występujące przy tej częstotliwości, znajduje się w miejscu otworów elementu osłony łopatek pompy. Prawdopodobnie jest to więc hałas łopatek pompy, który emitowany jest przez otwory wentylacyjne. Następne sporządzone wizualizacje (rys. 15.-17.) dotyczą kolejnych wytypowanych maksimów. Wynika z nich,

że źródłem hałasu w przypadku częstotliwości 3000 Hz, 5300 Hz i 7800 Hz jest króciec wlotowy (ssawny) pompy próżniowej.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono sposób działania mobilnego stanowiska do wizualizacji pola akustycznego wokół maszyn i urządzeń z wykorzystaniem pomiaru prędkości akustycznej w polu bliskim oraz wyniki pomiarów przykładowych obiektów, zrealizowanych na przykładach: zestawu głośnikowego i pompy próżniowej. Wyniki te wskazują, że wizualizacje realizowane z użyciem mobilnego stanowiska, dostarczają dokładnych informacji o lokalizacji lokalnych źródeł emisji hałasu. Uzyskane wizualizacje sprawdzają się również w przypadku obecności dodatkowego źródła hałasu zakłócającego. Do ograniczeń metody zaliczyć można przede wszystkim charakter hałasu emitowanego przez źródło (badania powinny być wykonywane wyłącznie dla hałasu ustalonego) oraz przepływ powietrza, występujący w pomiarach w polu bliskim. Przeprowadzone badania pozwoliły ocenić pozytywnie sposób działania mobilnego stanowiska.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ENGEL, Z., PIECHOWICZ, J., PLEBAN, D., STRYCNIEWICZ, L., Minimalizacja przemysłowych zagrożeń wibroakustycznych – Poradnik [Minimalization of industrial vibroacoustic hazards – a Guide]. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2005.
- [2] ENGEL, Z., PIECHOWICZ, J., PLEBAN, D., STRYCNIEWICZ, L., Hale przemysłowe, maszyny i urządzenia – wybrane problemy wibroakustyczne [Industrial depots, machines and tools – selected vibroacoustic problems]. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2009.
- [3] WEYNA, S., Rozprzysławienie energii akustycznych źródeł rzeczywistych [Energy dispersal of acoustic factual sources]. Wyd. Naukowo-Techniczne 2005.
- [4] SIMONS, D. G., SNELLEN, M., VAN MIDDEN, B., ARNTZEN, M., BERGMANS, D. H. T., Assessment of noise level variations of aircraft flyovers using acoustic arrays. Journal of Aircraft, 2015, Vol. 52, 1625-1633.
- [5] BALLESTEROS, J.A., SARRADJ, E., FERNANDEZ, M.D., GEYER, T., Noise source identification with beamforming in the pass-by of a car. Applied Acoustics, 2015, Vol. 93, 106-119.
- [6] KITAGAWA, T., THOMPSON, D., The horizontal directivity of noise radiated by a rail and implications for the use of microphone arrays. Journal of Sound and Vibration, 2010, Vol. 329, 202-220.
- [7] CHRISTENSEN, J. J., Technical review: beamforming, tech. rep., Brüel & Kjær, 2004.
- [8] MAKAREWICZ, R., Dźwięki i fale. Wyd. Naukowe UAM, Poznań 2017.
- [9] FERNANDEZ, COMESANA, D., Scan-based sound visualisation methods using sound pressure and particle velocity. PhD thesis, University of Southampton, 2014.

*Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017-2019 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*