

dr inż. Jerzy Motylewski
mgr inż. Piotr Pawłowski
mgr inż. Michał Rak
dr inż. Tomasz G. Zieliński
Zakład Technologii Inteligentnych
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

IDENTYFIKACJA ŹRÓDEŁ AKTYWNOŚCI WIBROAKUSTYCZNEJ MASZYN METODĄ KSZTAŁTOWANIA WIĄZKI SYGNAŁU (BEAMFORMING)

1. Wstęp

W zagadnieniach identyfikacji i lokalizacji źródeł aktywności wibroakustycznej maszyn, istotnym problemem jest wizualizacja pól rozkładu wielkości akustycznych na wybranych powierzchniach oraz określenie udziału poszczególnych źródeł w bilansie energetycznym sygnału wibroakustycznego maszyny.

Jednymi z metod tego typu badań są metody pomiaru ciśnienia lub natężenia dźwięku, które umożliwiają lokalizację i identyfikację źródeł bez przerywania procesu technologicznego i ingerencji w pracę maszyny.

W ostatnich latach rozwinęły się w tej dziedzinie metody i systemy pomiarowe oparte na wielokanałowych pomiarach wielkości akustycznych przy użyciu specjalnych matryc mikrofonowych. Do tych metod zaliczamy holografię akustyczną (STSF-Spatial Transformation of Sound Fields) oraz metodę kształtowania wiązki (Beamforming), które łączą w sobie pomiar wielopunktowy oraz zaawansowane techniki numeryczne, pozwalające na obliczenie rozkładów ciśnienia i natężenia dźwięku na powierzchni oddalonej od płaszczyzny pomiarowej.

2. Podstawy metody kształtowania wiązki sygnału akustycznego

Stosowane w wibroakustyce metody formowania wiązki (beamforming) polegają na przestrzenno-czasowym przetwarzaniu sygnału rejestrowanego przez matrycę mikrofonową (rys.1). Identyfikacja źródła odbywa się poprzez analizę zależności

amplitudowo-fazowych sygnałów akustycznych padających na poszczególne przetworniki matrycy.



Rys.1 Widok matrycy mikrofonowej

Każdy z mikrofonów matrycy posiadający pozycję określoną wektorem położenia \mathbf{x}_i względem przyjętego jej środka, dokonuje pomiaru ciśnienia akustycznego p_i . Ogniskowanie wiązki sygnału w kierunku propagacji fali akustycznej opisanej jednostkowym wektorem falowym \mathbf{k} , polega na wprowadzeniu opóźnień czasowych Δ_i dla każdego przetwornika matrycy. Po zsumowaniu opóźnionych odpowiedzi wszystkich przetworników otrzymujemy wypadkowy sygnał $P(\mathbf{k}, t)$ w postaci:

$$P(\mathbf{k}, t) = \sum_i p_i(t - \Delta_i(\mathbf{k})).$$

Często zamiast algorytmu w domenie czasowej stosowana jest jego wersja w dziedzinie częstotliwości i wówczas wypadkowy sygnał $\tilde{P}(\mathbf{k}, \omega)$ ma postać:

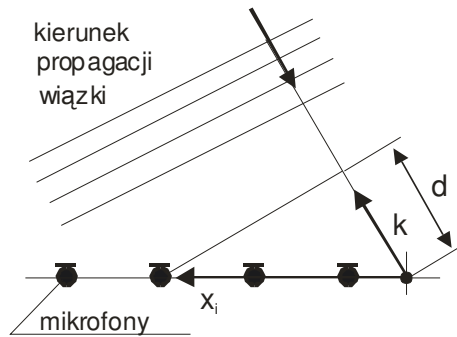
$$\tilde{P}(\mathbf{k}, \omega) = \sum_i \tilde{p}_i(\omega) e^{-j\omega\Delta_i(\mathbf{k})}.$$

Wielkości opóźnień czasowych Δ_i wynikają z geometrii matrycy oraz założonego rodzaju fali akustycznej. Na rys.2. przedstawiono przykład kształtowania wiązki akustycznej fali płaskiej.

Zgodnie z oznaczeniami na powyższym rysunku, opóźnienie czasowe dla fali płaskiej wynosi:

$$\Delta_i = \frac{d}{c} = \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_i}{c},$$

gdzie: c – prędkość propagacji fali dźwiękowej.



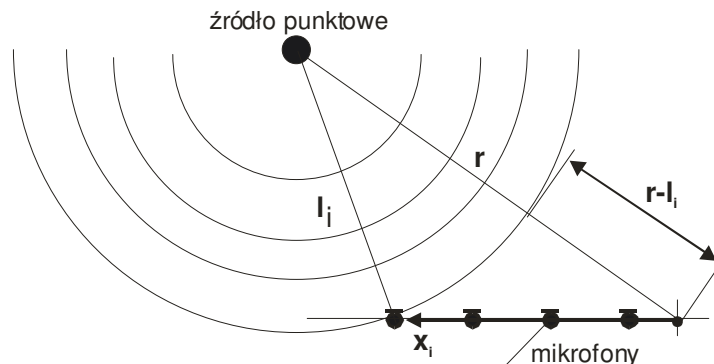
Rys.2 Przykład kształtowania wiązki akustycznej fali płaskiej

W przypadku źródła punktowego fala akustyczna ma charakter kulisty i wówczas obliczenia lokalizacji źródła wykorzystują zależność na wielkość opóźnień czasowych:

$$\Delta_i = \frac{r - l_i}{c},$$

gdzie: r – odległość środka matrycy od źródła punktowego, l_i – odległość i -tego mikrofonu od źródła punktowego.

Przykład kształtowania wiązki akustycznej fali kulistej podany jest na rys.3.

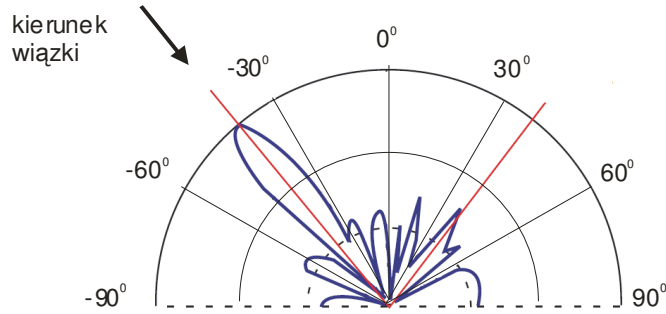


Rys.3 Przykład kształtowania wiązki akustycznej fali kulistej

Przeprowadzenie operacji sumowania z opóźnieniem (ang. „delay and sum”) dla całej matrycy mikrofonowej prowadzi do koherentnego dodawania amplitud fali z wybranego kierunku. Niekoherentna superpozycja fal z pozostałych kierunków powoduje natomiast zmniejszenie amplitudy tych fal i osłabienie ich wpływu w wypadkowym sygnale $P(\mathbf{k}, t)$.

Wraz ze zmianą kierunku ogniskowania i częstotliwości fali, w przebiegu charakterystyki kierunkowej matrycy pojawiają się niekorzystne listki boczne ograniczające dynamikę wypadkowego sygnału i pogarszające wyniki identyfikacji

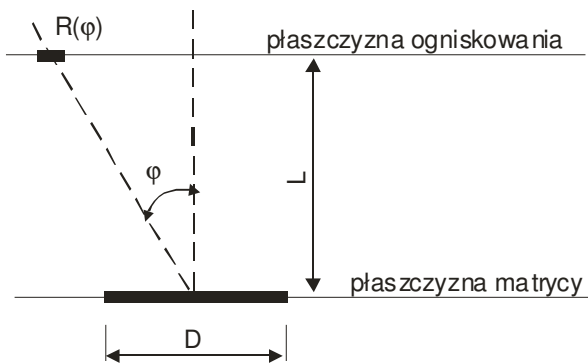
źródła. Przykładowa charakterystyka kierunkowa matrycy beamformingowej przedstawiona została na rys. 4.



Rys.4. Przykład charakterystyki kierunkowej matrycy.

Ponieważ charakterystyka kierunkowa matrycy zależy jest od przestrzennego rozmieszczenia przetworników, geometria ich położenia jest zoptymalizowana pod kątem ograniczenia wpływu listków bocznych. Wykorzystywane w pomiarach matryce zawierają zazwyczaj od 30 do 120 mikrofonów rozłożonych w sposób losowy.

Przebieg charakterystyki kierunkowej amplitudy sygnału akustycznego ma również znaczący wpływ na zdolność rozdzielczą układu (rys.5), rozumianą jako zdolność do odróżnienia fal padających z kierunków do siebie zbliżonych.



Rys.5. Zależność rozdzielczości od parametrów geometrycznych układu

Z kryterium Rayleigh'a, które stwierdza, że maksimum jednego obrazu dyfrakcyjnego leży w miejscu minimum drugiego obrazu, wynika wzór na rozdzielczość przestrzenną R w płaszczyźnie ogniskowania:

$$R(\varphi) = \frac{a}{\cos^3(\varphi)} \frac{L}{D} \lambda,$$

gdzie: a - parametr zależny od kształtu geometrycznego matrycy (dla matrycy kołowej $a \cong 1.22$), λ - długość fali, D - średnica charakterystyczna matrycy, L - odległość matrycy od płaszczyzny ogniskowania, φ - kąt odchylenia kierunku ogniskowania wiązki od centralnej osi matrycy.

Z powyższej relacji na rozdzielczość przestrzenną R wynika, że rozdzielczość ta w kierunku centralnym będzie pogarszała się wraz ze wzrostem odległości od płaszczyzny matrycy oraz ze zmniejszeniem się częstotliwości fali akustycznej. Rozdzielczość na płaszczyźnie ogniskowania zależy również od członu $1/\cos^3(\varphi)$, malejąc wraz z oddalaniem się od centralnej osi matrycy.

Minimalna rozdzielczość oraz wielkość listków bocznych w charakterystyce kierunkowej decydują głównie o zakresie stosowalności metody w pomiarach związanych z identyfikacją i lokalizacją źródeł aktywności wibroakustycznej maszyn.

3. Wstępne badania eksperymentalne

Obiektem wstępnych badań związanych z identyfikacją źródeł aktywności wibroakustycznej maszyn metodą kształtowania wiązki był, współpracujący z systemem niezależnych siłowników, zasilacz hydrauliczny typu Silentflo firmy MTS.

Z metodologicznego punktu widzenia interesujące jest określenie możliwości zastosowania metody kształtowania wiązki (beamformingu) w przypadku złożonych urządzeń posiadających źródła o małej aktywności wibroakustycznej, co było spełnione w przypadku badanego obiektu.

Do badań zastosowano 36 mikrofonową matrycę firmy Bruel&Kjaer w kształcie kołowym, o stochastycznie rozmieszczonych przetwornikach współpracującą z systemem PULSE, służącym do pomiaru, rejestracji i przetwarzania sygnału akustycznego. Widok stanowiska badawczego wraz z matrycą mikrofonową przedstawiono na rys.6.



Rys.6 Widok stanowiska badawczego wraz z matrycą mikrofonową

W badaniach przyjęto następujące, główne parametry systemu pomiarowego:

- obszar pomiaru na płaszczyźnie ogniskowania: proporcjonalny do $1.15L$ przy kącie $\varphi = 30^\circ$; - odległość matrycy od płaszczyzny ogniskowania: $L = 1.5\text{m} > D = 0.6\text{m}$;
- rozdzielczość przestrzenna: $R \cong L\lambda / D$; - zakres częstotliwości pomiarowych od 500Hz do 8kHz. Zakres częstotliwości pomiarowych ograniczony jest od dołu przez rozdzielczość przestrzenną, natomiast od góry przez maksymalną amplitudę listków bocznych w charakterystyce kierunkowej matrycy.

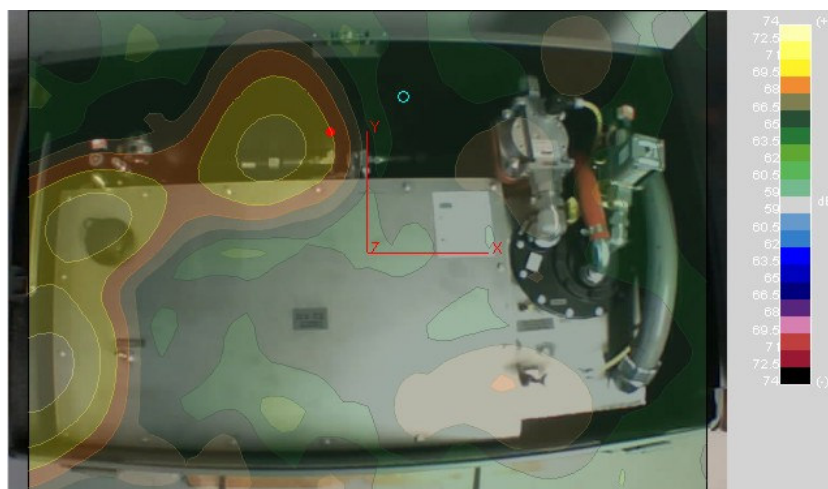
W badanym zasilaczu hydraulicznym występują źródła zarówno o charakterze wymuszeń mechanicznych (silnik napędzający, pompa, układy regulacji itp.), jak również wymuszeń przepływowych (instalacja hydrauliczna, instalacja chłodzenia wodnego, filtry przepływowe itp.). Przyjęty zakres badanych częstotliwości zawiera efekty wibroakustyczne obu typów źródeł z uwzględnieniem ich wzajemnego oddziaływania.

Przedstawione przykładowe rozkłady przestrzenne sygnałów akustycznych, obejmują 1/3-oktawowe pasma częstotliwości, z możliwością zmiany wartości progów dyskryminacji amplitudy sygnału celem lokalizacji poszczególnych źródeł.

Na rys.7 i rys.8 przedstawiono graficznie rozkłady ciśnienia akustycznego w płaszczyźnie górnej obudowy podstawowych zespołów funkcjonalnych zasilacza (silnik, pompa, zbiornik, chłodnica, zawory) dla częstotliwości środkowych filtrów tercjowych odpowiednio 2kHz i 3.15kHz.



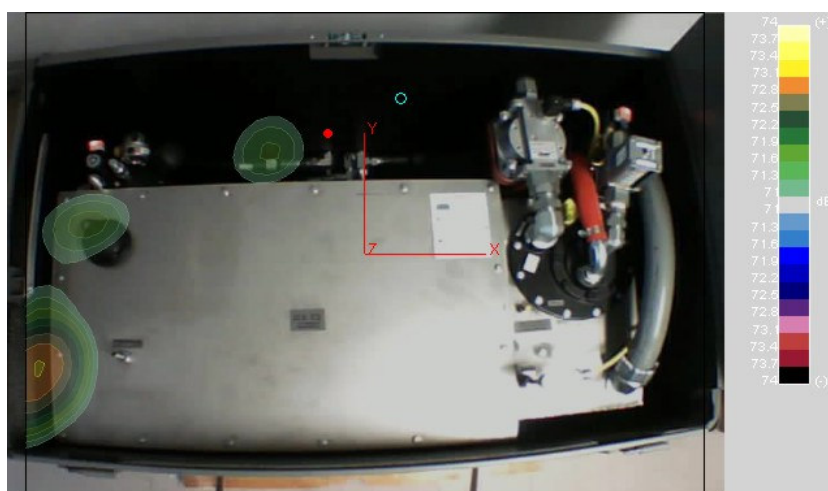
Rys.7 Rozkład poziomy ciśnienia akustycznego w 1/3 oktawowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej 2kHz



Rys.8 Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w 1/3 oktawowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej 3.15kHz

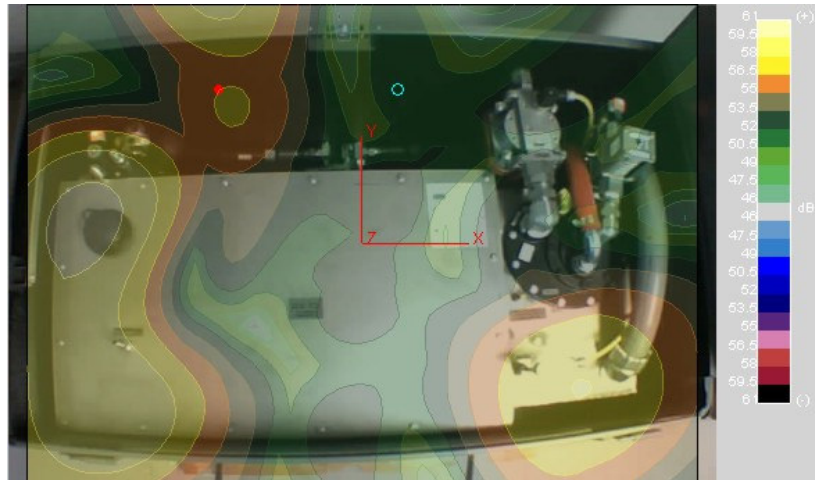
Jako próg dyskryminacji amplitudy sygnału ciśnienia akustycznego przyjęto na rys.7 i rys.8 wartość poziomu mniejszą o 15dB od poziomu maksymalnego w danym paśmie tercjowym.

Zastosowanie progu dyskryminacji o wartości poziomu sygnału zbliżonej do poziomu maksymalnego pozwala na dokładniejszą lokalizację poszczególnych źródeł, co przykładowo pokazano na rys.9, który przedstawia rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w 1/3 oktawowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej 3.15kHz przy zmianie poziomu dyskryminacji do wartości 3dB.



Rys.9 Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w 1/3 oktawowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej 3.15kHz - próg 3dB

Metoda beamformingu jest bardzo przydatna przy obserwacji zmian aktywności wibroakustycznej maszyny przy zmianach jej parametrów eksploatacyjnych. Dla przykładu na rys.10 podano charakterystykę rozkładu przestrzennego ciśnienia akustycznego przy zmniejszonym, rozruchowym ciśnieniu roboczym zasilacza hydraulicznego.



Rys.10 Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego w 1/3 oktawowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej 2kHz przy zmniejszonym ciśnieniu roboczym zasilacza

Podane w postaci graficznej, wstępne rezultaty badań przedstawiają jedynie potencjalne możliwości prezentowanej metody. Należy podkreślić, iż wszystkie wyniki rejestrowane są w postaci cyfrowej i możliwa jest szeroka ich analiza różnego rodzaju metodami przetwarzania sygnałów. Pozwala to również na prowadzenie statystycznej obróbki danych i archiwizacji wyników badań.

Otrzymane rezultaty badań w pełni potwierdzają zalety metody beamformingu w określeniu lokalizacji i identyfikacji źródeł aktywności wibroakustycznej maszyny.

Literatura

1. J. Christensen, J. Hald, *Beamforming*, Bruel&Kjaer Technical Review No.1, 2004
2. Katalog firmy MTS, *SilentFlo™ Hydraulic Power Units*, MTS SYSTEM CORP. 2005

Badania realizowane w ramach Projektu Nr POIG.0101.02-00-015/08 (PKAERO) w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.