

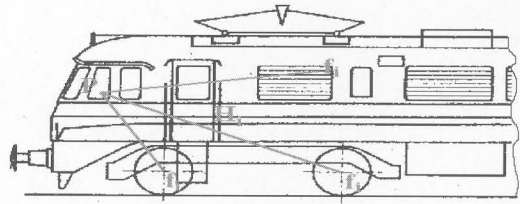
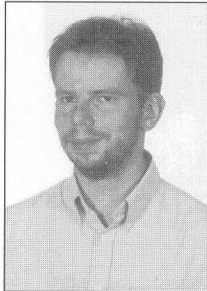
## Krzysztof MENDROK

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI, KATEDRA ROBOTYKI I DYNAMIKI MASZYN

# Analiza dróg rozchodzenia się energii w konstrukcjach jako nowoczesne narzędzie eksperymentalnej oceny bezpieczeństwa i komfortu w przemyśle środków transportu

Dr inż. Krzysztof MENDROK

Jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie. Jego zainteresowania skupiają się na zagadnieniach dynamiki strukturalnej, a w szczególności na algorytmach analizy modalnej i analizy dróg rozchodzenia się energii w konstrukcjach. Zajmuje się wykorzystaniem tych metod do wykrywania uszkodzeń. Jest autorem prac podejmujących tę tematykę [mendrok@agh.edu.pl](mailto:mendrok@agh.edu.pl)



Rys.1. Schematyczne przedstawienie idei algorytmów TPA

### Streszczenie

W pracy opisano eksperymentalną technikę oceny rozchodzenia się drgań i hałasu w konstrukcjach. Metoda ta stosowana jest głównie w przemyśle środków transportu. Pokazano podstawowe założenia i metodykę. Dużo uwagi zostało poświęcone metodom pozyskiwania i syntezy danych, których pomiar wprost jest utrudniony. Pokazano także narzędzie opracowane w środowisku Matlab służące do przeprowadzania omawianej analizy.

### Abstract

In this paper an experimental technique for noise and vibration transfer path analysing is described. This method is mainly used in transportation industry. Basis assumptions and methodology, measurement techniques and non-measurable data synthesis methods are shown. Additionally a software tool for TPA calculations developed in Matlab environment is presented.

**Słowa kluczowe:** analiza dróg rozchodzenia się energii, analiza modalna, model modalny

**Keywords:** transfer path analysis, modal analysis, modal model

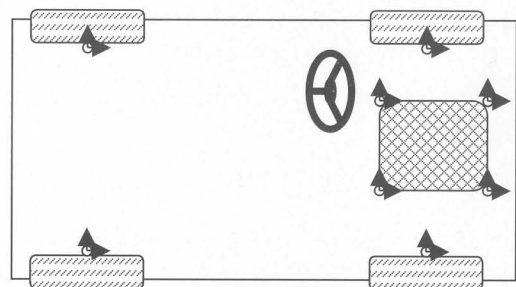
## 1. Wstęp

Współczesne projektowanie złożonych urządzeń technicznych takich jak samochody, samoloty, pociągi, czy tramwaje wymaga spełnienia wysokich wymagań co do komfortu i bezpieczeństwa użytkownika. Istotny wpływ na komfort kierującego pojazdem bądź pasażera ma poziom hałasu i poziom drgań we wnętrzu. Te dwa czynniki powodują też powstawanie chorób zawodowych u operatorów, kierowców, czy pilotów, np.: częściowa utrata słuchu spowodowana zbyt długim przebywaniem w hałasie, cały szereg chorób spowodowanych wibracjami. Dlatego też dąży się do minimalizacji poziomu hałasu we wnętrzu pojazdów oraz redukcji drgań oddziałujących na użytkownika. Aby ocenić które ze źródeł (silnik, zawieszenie, itp.) ma największy udział w generowaniu wibracji i istotnie wpływa na poziom hałasu oraz sprawdzić, którymi ścieżkami energia przedostaje się od źródła do punktu oceny stosowane są coraz powszechniej algorytmy analizy rozchodzenia się energii w konstrukcjach. Są one narzędziem używanym zarówno do analizy modeli symulacyjnych na etapie konstruowania, jak i w laboratorium do testowania prototypów.

## 2. Opis algorytmów

Algorytmy analizy rozchodzenia się energii w konstrukcjach zwane w skrócie TPA (ang. Transfer Path Analysis) pozwalają na wyznaczenie możliwych dróg rozchodzenia się energii, pochodzącej z różnych źródeł drgań, do określonych miejsc konstrukcji zwanych kierunkami oceny [1], [5], [6], [11], [13]. Pozwalają na zlokalizowanie najistotniejszych ścieżek rozchodzenia się energii dla danego zagadnienia i umożliwiają ocenę wpływu ich działania na badane miejsce obiektu zwane kierunkiem oceny. Główne elementy dotyczące omawianego zagadnienia zostały przedstawione na rysunku 1.

Rysunek 1 zawiera trzy główne elementy analizy rozchodzenia się energii w konstrukcjach zaprezentowane na przykładzie lokomotywy. Pierwszy człon to źródło wymuszenia  $f_i$ . Może ono mieć charakter zarówno akustyczny jaki i wibracyjny. Gdy źródło jest strukturalne wówczas wielkością analizowaną jest siła. Dla źródeł akustycznych rozważamy prędkość cząstki akustycznej. Wiadomo, że cząsteczki powietrza drgają, pobudzone przez źródło dźwięku. Aby osiągnąć konkretną częstotliwość drgań przy danej amplitudzie, cząsteczki muszą osiągnąć pewną prędkość ruchu. Podczas rozchodzenia się fali dźwiękowej nie zmieniają one położenia, jedynie oscylują wokół punktu spoczynkowego. Wykonują wtedy ruch wzdłuż lub w poprzek fali. Prędkość tej oscylacji zależy wprost od częstotliwości drgań oraz ich amplitudy. W przedstawionym przykładzie jako źródła wymuszenia przyjęto układ napędowy i zawieszenie kół. Charakter obu źródeł jest dwójaki. Zarówno silnik jak i zawieszenie generują drgania i hałas. Dalej energia powstająca w źródłach przenoszona jest przez ścieżki przejścia  $H_{ij}$  do kierunku oceny  $p_j$ , czyli punktu gdzie dokonywany jest pomiar hałasu bądź drgań. W danym przypadku kierunek oceny ma charakter akustyczny i jest nim poziom ciśnienia akustycznego mierzony w miejscu gdzie znajduje się np.: głowa maszynisty. Można jednak łatwo sobie wyobrazić wibracyjny kierunek oceny np.: drgania siedziska, czy koła kierownicy. W przypadku, gdy w kierunku oceny jest mierzony poziom hałasu, ścieżki przejścia są typu akustycznego. Natomiast gdy badaną odpowiedzią układu są drgania, wtedy ścieżki przejścia mają charakter strukturalny. Przykładowo, jeżeli za źródło drgań przyjmiemy pracujący silnik to strukturalnymi ścieżkami przejścia będą jego mocowania do nadwozia. Każdy punkt mocowania stanowi trzy ścieżki przejścia, gdyż niezależnie rozpatrywane są trzy prostopadłe kierunki.



Rys.2. Przykład strukturalnych ścieżek przejścia.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat samochodu. Silnik i koła to źródła drgań, wibracje kierownicy stanowią kierunek oceny. Strukturalne ścieżki przejścia zostały oznaczone strzałkami.

## 3. Podstawy teoretyczne

Podstawowa metodologia bazuje na dynamicznym modelu konstrukcji, który wprowadza związek pomiędzy wektorem wymuszeń  $\{f(\omega)\}$ , a wektorem odpowiedzi w kierunkach oceny  $\{p(\omega)\}$ , wykorzystując macierz Widmowych Funkcji Przejścia (WFP) -  $[H(\omega)]$  [1], [11]:

$$\{p(\omega)\} = [H(\omega)] \cdot \{f(\omega)\} \quad (1)$$

gdzie:  $f$  może być siłą albo prędkością cząstki akustycznej w zależności czy rozważamy strukturalną czy akustyczną drogę przejścia energii.

Różne typy wymuszeń i kierunków oceny są traktowane jako dwa różne podukłady. Podukłady te związane są ze sobą przez pewną liczbę mniej lub bardziej sztywnych połączeń, tworzących ścieżki przejścia. Jeżeli system składa się z  $N$  ścieżek przejścia, wtedy całkowita odpowiedź w kierunku oceny może być zapisana jako suma cząstkowych odpowiedzi z poszczególnych ścieżek:

$$p(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{P_i(\omega)}{F_i(\omega)} f_i(\omega) \quad (3)$$

gdzie:  $p(\omega)$  - odpowiedź w kierunku oceny, która może być funkcją częstotliwości lub obr/min

$\frac{P_i(\omega)}{F_i(\omega)}$  - to WFP pomiędzy kierunkiem oceny, a źródłem (siłą lub prędkością akustyczną cząstki) dla ścieżki przejścia  $i$ .

$f_i(\omega)$  - siła lub prędkość cząstki akustycznej dla ścieżki przejścia  $i$ . Aby przeprowadzić analizę rozchodzenia się energii w konstrukcjach musimy zbudować kompletną macierz widmowych funkcji przejścia. Widmowe funkcje przejścia muszą zostać zarejestrowane dla wszystkich ścieżek przejścia do danego kierunku oceny. Powinny być mierzone dla każdego źródła osobno aby wykluczyć nakładanie się wpływów poszczególnych sił.

Każdy kierunek w punkcie, który wybraliśmy jako miejsce, gdzie energia jest przekazywana od źródła do kierunku oceny, jest osobną ścieżką przejścia. Należy przeprowadzić pomiar WFP w tych punktach. Jako urządzenie wymuszające może być stosowany młotek modalny lub wzbudnik elektrodynamiczny. Odpowiedź może mieć charakter mechaniczny lub akustyczny. Akustyczne ścieżki przejścia są przeważnie mierzone w sposób odwrotny. Wymuszenie jest realizowane przy pomocy głośnika w punkcie wybranym jako ścieżka przejścia, a odpowiedź jest mierzona mikrofonem w punkcie działania wymuszenia.

#### 4. Dane niezbędne do przeprowadzenia analizy

Wzór (3) ujawnia, iż do przeprowadzenia analizy rozchodzenia się energii w konstrukcji niezbędna jest pełna macierz widmowych funkcji przejścia oraz wektor sił wymuszających lub prędkości cząstki akustycznej. Nawet w warunkach laboratoryjnych niemożliwe jest zmierzenie niektórych sił operacyjnych (na przykład w kierunku stycznym do powierzchni konstrukcji) bez modyfikacji konstrukcji mogącej zmienić parametry obiektu. Z tych samych powodów niemożliwy jest pomiar wszystkich WFP. Podobnie sytuacja ma się z prędkościami cząstki akustycznej.

#### 4.1. Synteza brakujących widmowych funkcji przejścia

Objekt poddawany analizie TPA musi spełniać następujące założenia:

- liniowość - odpowiedź układu jest proporcjonalna do wymuszenia działającego na badany obiekt,
- stałość współczynników modelu modalnego w czasie eksperymentu,
- spełnienie zasady wzajemności Maxwella, zakładającej, że charakterystyki zebrane w punkcie A na konstrukcji przy wymuszeniu układu w punkcie B są takie same jak przy wymuszeniu w punkcie A i pomiarze w punkcie B,
- obserwowalność układu,
- małe lub proporcjonalne tłumienie w badanym układzie.

Są to założenia, które musi spełniać obiekt, aby mógł być poddany analizie modalnej [7], [9]. Dlatego też na podstawie widmowych funkcji przejścia, które mogły być zmierzone, estymujemy model modalny obiektu. Znając model modalny obiektu możemy dokonać syntezy brakujących funkcji przejścia [3], [7], [9].

## 4.2 Identyfikacja prędkości cząstki akustycznej

Jeżeli rozważamy źródło akustyczne to jego powierzchnia promieniująca fale jest dzielona na mniejsze obszary i przy jego opisie, oceniane są osobno prędkości pojemnościowe poszczególnych obszarów. Prawidłowy podział powierzchni źródła jest bardzo istotny z punktu widzenia dalszej analizy i poprawności jej wyników [1]. Użyteczna może być wskazówka, iż wymiary poszczególnych obszarów powinny być mniejsze niż najmniejsza długość fali akustycznej z analizowanego zakresu częstotliwości podzielona przez 6. Prędkości akustyczne cząstki  $q$  są więc używane do zestawienia wektora obciążeń i mogą być wyliczone kilkoma metodami [1]:

- próbkowanie powierzchni punkt po punkcie,
- metoda odwracania macierzy,
- metoda pomiaru natężenia.

Metoda próbkowanie powierzchni punkt po punkcie pozwala na wyznaczenie zastępczej prędkości cząstki akustycznej źródła na podstawie pomiaru przyspieszeń drgań obszarów powierzchni emitującej. Zakłada się, że przyspieszenie zmierzone w danym punkcie w kierunku normalnym do powierzchni reprezentuje profil przyspieszenia, który może być wykorzystany do oceny prędkości cząstki akustycznej całej powierzchni. Założenie to wymaga podziału całej powierzchni emitującej na mniejsze obszary, w których może ono być spełnione. Przyspieszenie cząstki akustycznej  $q_j'$  każdej z  $m$  próbkowanych obszarów  $S_j$  jest wyliczany jako iloczyn pola powierzchni obszaru przez przyspieszenie mierzone w środku obszaru w kierunku normalnym. Prędkość cząstki akustycznej  $q_j$  jest wyliczana przez całkowanie przyspieszenia. Do wykonania pomiarów najczęściej używa się czujników akcelerometrycznych, stąd konieczność całkowania. Pomiary wykonywane przy pomocy skanowania laserowego pozwalają na bezpośrednie wyliczenie prędkości cząstki akustycznej bez konieczności dokonywania całkowania.

Metoda odwracania macierzy jest używana do wyznaczania niewprost prędkości cząstki akustycznej źródła. W tym celu mierzone są odpowiedzi  $p_j$  w postaci ciśnienia akustycznego w pobliżu emitującego źródła w określonych punktach  $j$ . Następnie zestawiana jest macierz bliskopolowych WFP  $[H]$  pomiędzy ciśnieniem akustycznym zmierzonym w punktach  $j$ , a prędkością cząstki akustycznej emitujących powierzchni. Przy pomocy tych danych prędkość cząstki akustycznej jest wyliczana ze wzoru:

$$\{q\} = [H]^{-1} \{p\} \quad (4)$$

Funkcje przejścia są mierzone przy wykorzystaniu zasady wzajemności Maxwella. W miejscach, gdzie mierzone było ciśnienie akustyczne, ustawiane są głośniki, a mikrofony rejestrują odpowiedzi na powierzchni źródła, które w czasie tych pomiarów jest wyłączone. Pomiar mikrofonowy wykonywany jest w  $i$  punktach, na które została zdyskretyzowana powierzchnia źródła. Zarejestrowane w ten sposób WFP  $H_{ji}$  zgodnie z zasadą wzajemności są równe szukanym  $H_{ij}$ .

Podstawą metody pomiaru natężenia są pomiary w polu bliskim natężenia dźwięku generowanego przez źródło, które mogą być przeprowadzone w komorze bezchowej. Wynikiem takich pomiarów jest moc akustyczna źródła w warunkach bezchowych. Na podstawie znajomości mocy akustycznej, można wyliczyć prędkość cząstki akustycznej. Przy założeniu, że prędkość cząstki akustycznej źródła jest niezależna od zmiany akustycznych warunków brzegowych. Z pomiarów wykonanych w komorze bezchowej wyznaczamy średnie natężenie dźwięku powierzchni pomiarowej  $S$  wokół źródła. Powierzchnia  $S$  jest dzielona na  $m$  mniejszych obszarów, z których każdy traktowany

jest jako osobne źródło cząstkowe. Całkując iloczyn skalarny średniego natężenia dźwięku przez wektor normalny po powierzchni otrzymujemy wyemitowaną przez tę powierzchnię moc akustyczną. Dalej, przy pewnych założeniach, można zapisać następującą zależność pomiędzy prędkością cząstki akustycznej  $q_j$ , a mocą akustyczną  $N_j$ :

$$q_j^2 = N_j \cdot \frac{2\pi c}{\rho\omega^2} \quad (5)$$

gdzie:  $c$  - cząstkowa prędkość powietrza,  
 $r$  - gęstość powietrza.

Ponieważ wyliczamy kwadrat prędkości cząstki akustycznej metoda ta nie daje informacji o fazie wymuszenia. Stanowi to ograniczenie przy niskich częstotliwościach, gdyż dla tych zakresów informacja o fazie pozwala na ocenę, czy odpowiednie źródła nie są skorelowane.

### 4.3. Identyfikacja sił eksploatacyjnych

Podobnie jak w wypadku prędkości cząstki akustycznej dla analizy rozchodzenia się energii pochodzenia akustycznego, przy wymuszeniu mechanicznym i rozpatrywaniu strukturalnych ścieżek przejścia, niezbędna jest znajomość sił eksploatacyjnych działających w tych ścieżkach, a pochodzących od źródeł drgań. Siły te mogą być zmierzone wprost przy pomocy czujników siły, jednakże nawet w warunkach laboratoryjnych często nie jest to możliwe bez takiej modyfikacji obiektu, która istotnie wpływa na jego dynamikę. Dlatego praktycznie niemożliwe jest przeprowadzenie analizy rozchodzenia się energii drgań bez zastosowania metod identyfikacji obciążeń na podstawie pomiarów odpowiedzi. Do tego celu stosuje się metody deterministyczne identyfikacji obciążeń [1], [2], [4]. Algorytmy rozchodzenia się energii w konstrukcjach wykorzystują trzy metody estymujące siłę w ścieżkach przejścia, wszystkie operują w dziedzinie częstotliwości. Są to kolejno:

- metoda zespolonej sztywności dynamicznej
- metoda odwracania macierzy WFP.

W przypadku, gdy siła przenoszona jest przez element podatny lub, którego sztywność jest mniejsza od sztywności reszty konstrukcji, siły eksploatacyjne  $\{f\}$  mogą być zidentyfikowane przy pomocy metody zespolonej sztywności dynamicznej połączeń  $[K]$ . Do przeprowadzenia metody niezbędna jest znajomość macierzy  $[K]$  oraz przemieszczeń po obu stronach złącza  $\{X_s\}$  (od strony źródła siły),  $\{X_t\}$  (od strony pomiaru odpowiedzi) podczas pracy układu:

$$\{f(\omega)\} = [K(\omega)] (\{X_s(\omega)\} - \{X_t(\omega)\}) \quad (1)$$

Druga z metod oparta o odwracanie macierzy widmowych funkcji przejścia działa analogicznie jak opisana metoda wyznaczania prędkości akustycznej cząstki. Przeprowadzając pomiar widm  $t(\omega)$  odpowiedzi na wymuszenie w pewnej ilości  $n$  punktów pomiarowych można zidentyfikować wektor sił działających  $f(\omega)$  wyznaczając macierz pseudo-odwrotną do macierzy  $H(\omega)$  (o wymiarach  $n \times m$ ) wg zależności:

$$\{f(\omega)\} = [H(\omega)]^{-1} \{p(\omega)\} \quad (2)$$

Niektóre elementy macierzy  $[H]$  można wyznaczyć bezpośrednio eksperymentalnie wykorzystując np. metodę testu impulsowego. Należy zauważyć, że jeżeli w przypadku rozważanego obiektu spełniona jest zasada wzajemności ( $H_{ij} = H_{ji}$ ), to wymuszenie impulsowe można przykładać zarówno w punkcie, w którym działa siła, jak i w punkcie pomiaru sygnału odpowiedzi (wtedy sygnał odpowiedzi jest mierzony w punkcie i kierunku działania siły). Wyznaczenie eksperymentalne wszystkich wymaganych widmowych funkcji przejścia (WFP) jak już wspo-

mniano nie jest możliwe. Powoduje to konieczność wykorzystania do określenia niektórych elementów macierzy  $[H]$  modelu modalnego rozważanego obiektu. W badaniach modalnych wyznacza się zwykle 1, 2 lub bardzo rzadko 3 i więcej wierszy lub kolumn macierzy  $[H]$ . Pozostałe elementy są określane przy założeniu spełnienia zasady wzajemności. Macierz  $[H]$  może być również wyznaczona na podstawie modelu elementów skończonych, który zastał uprzednio dostrojony do eksperymentalnego modelu modalnego. Ma to szczególne znaczenie w praktycznym przypadku, gdy ze względów technicznych w czasie eksperymentu nie ma możliwości, ani pomiaru sygnału odpowiedzi  $t_k$ , ani tym bardziej przyłożenia siły w obszarze badanego obiektu odpowiadającym obszarowi wymuszenia.

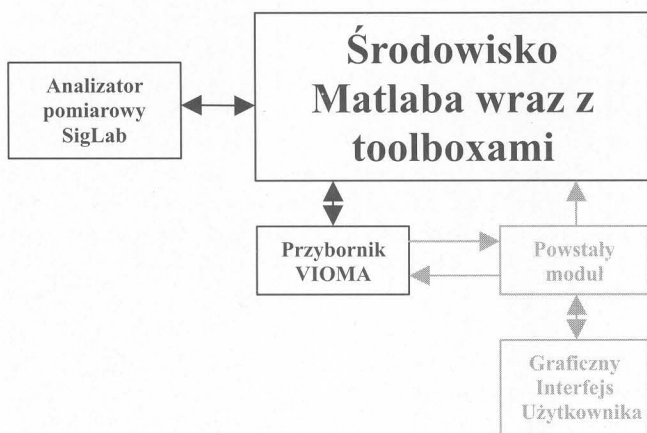
Przeprowadzenie nadmiarowego pomiaru sygnałów odpowiedzi na wymuszenie ( $n \geq m$ ) oraz zastosowanie rozkładu na wartości szczególne (osobliwe) pozwala polepszyć uwarunkowanie numeryczne poszukiwania pseudo-odwrotnej macierzy charakterystyk widmowych.

### 5. Implementacja programowa algorytmów analizy dróg rozchodzenia się energii

Obecnie na rynku istnieje kilka pakietów realizujących algorytmy analizy dróg rozchodzenia się energii drgań. Tutaj wymienić można takie programy jak CADA - X, moduł TPA firmy LMS Int. [1], czy SPID firmy INRIA [8]. Są to jednak drogie przybory dedykowane do przemysłu środków transportu. Kolejną wadą wszystkich tych pakietów jest zamkniętość kodu, brak możliwości jego edycji. Sytuacja taka uniemożliwia praktycznie modyfikację istniejących algorytmów, a co za tym idzie próbę zastosowania ich w inny sposób niż wskazany przez wytwórcę. W celu przetestowania prezentowanych metod lub podjęcia próby zastosowania ich do odmiennych zadań np. do diagnostyki utworzone zostało nowe oprogramowanie. Jako środowisko programowania wybrano pakiet Matlab z uwagi na następujące jego cechy:

- szybkość działania utworzonych procedur numerycznych,
- łatwość języka programowania,
- możliwość edycji i usuwania błędów,
- dostępność sprawdzonych procedur numerycznych,
- możliwość tworzenia graficznych interfejsów użytkownika,
- łatwość wizualizacji wyników,
- możliwość szybkiego wprowadzania modyfikacji istniejących procedur,
- otwartość tworzonego kodu,
- łatwy import i eksport danych,
- działanie na różnych platformach sprzętowych.

Dodatkowym argumentem przemawiającym za zastosowaniem środowiska Matlab był fakt, iż w zespole, którego autorzy niniejszej pracy są członkami, rozwijane jest oprogramowanie dedykowane do analizy modalnej, pracujące w Matlab'ie. Jest to przyboryk VIOMA [10] i powstałe oprogramowanie do analizy dróg rozchodzenia się energii w konstrukcjach będzie stanowiło jego uzupełnienie. Matlab, ponadto, umożliwia bezpośredni dostęp do danych pomiarowych. Możliwość ta wynika z ścisłej integracji analizatora pomiarowego SigLab ze środowiskiem Matlab [12]. SigLab sterowany jest z poziomu Matlab przy pomocy złącza SCSII. Wszystkie dane pomiarowe zbierane przez analizator przesyłane są do Matlab. Tutaj następuje ich dalsze przetwarzanie i archiwizacja. Wstępne przetwarzanie odbywa się na drodze sprzętowej w SigLabie, dzięki jego konstrukcji opartej na technologii procesorów sygnałowych. Umożliwia on na przykład liczenie transformacji Fouriera w czasie rzeczywistym w szerokim paśmie częstotliwości.

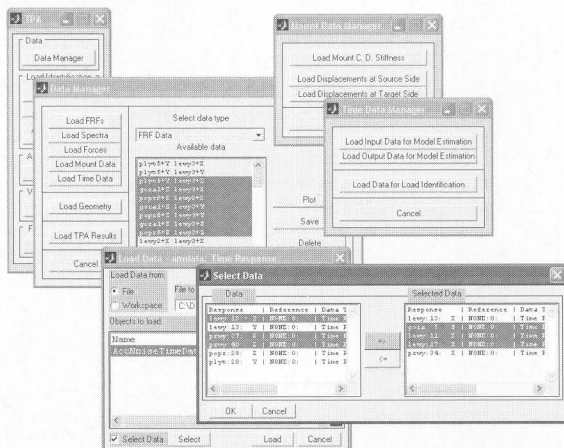


Rys. 3. Schemat przedstawiający architekturę powstałego modułu

Głównym elementem systemu przedstawionego na rysunku 3 jest środowisko Matlaba, które umożliwi przeprowadzenie niezbędnych obliczeń oraz wizualizację wyników. Dane zbierane i wstępnie przetwarzane przez SigLaba, przesyłane są do przestrzeni roboczej Matlaba, tam poddawane są dalszej obróbce przy pomocy przybowników Matlaba zwanych też toolboxami. Zapis danych do odpowiedniego formatu następuje w przyborniku VIOMA, skąd są wczytywane do powstałego modułu. Użytkownik wykonuje wszystkie operacje przy pomocy graficznego interfejsu.

## 5.1. Opis utworzonego narzędzia programowego

Na podstawie sformułowanych założeń oraz zgodnie z przedstawionymi procedurami obliczeń opracowano narzędzie dedykowane do analizy dróg rozchodzenia się energii drgań w konstrukcjach. Na rysunku 4 przedstawiono wygląd głównego okna programu oraz okna menadżera danych.



Rys. 4. Okno główne i graficzny interfejs menadżera danych

Ich prosty układ ma służyć maksymalnemu ułatwieniu obsługi przez użytkownika. Przyjęto zasadę, że aby poprawnie przeprowadzić obliczenia należy poruszać się w oknie z góry na dół. Koncepcja taka stosowana jest konsekwentnie we wszystkich oknach graficznego interfejsu użytkownika, obsługujących kolejne moduły oprogramowania. Menadżer danych umożliwi import danych pomiarowych żadanego typu. Format danych wykorzystywany przez oprogramowanie jest zgodny z formatem obsługiwanym przez przybownik VIOMA. Kolejne kroki analizy wymagają uruchamiania kolejnych modułów oprogramowania, a więc identyfikacji sił wymuszających, analizy dróg rozchodzenia się energii i wizualizacji wyników. Ostatni z wymienionych modułów ma na celu ułatwienie interpretacji dużej ilości danych

jakie zwracają przedstawione algorytmy. Utworzone oprogramowanie pomyślnie przeszło weryfikację na danych symulacyjnych jak i eksperymentalnych. Działanie jego jest szybkie i poprawne pod względem obliczeniowym. Obsługa z uwagi na zastosowanie GUI jest łatwa i intuicyjna.

## 6. Podsumowanie

Obiekt poddawany analizie dróg rozchodzenia się energii drgań musi spełniać te same założenia jakie wymagane są przy stosowaniu analizy modalnej. Bazując na modelu modalnym obiektu prezentowana analiza pozwala na identyfikację źródeł, zarówno mechanicznych, jak i akustycznych oraz na ocenę ich wpływu na parametr mierzony w kierunku oceny. Ponadto określa którądy energia przekazywana jest od źródła do kierunku oceny.

Wyniki analizy rozchodzenia się energii wykorzystywane są zarówno do rozwiązywania problemów eksploatacyjnych typu zbyt wysoki poziom drgań lub hałasu, wówczas analiza jest realizowana na obiekcie rzeczywistym, jak i na etapie konstruowania, gdzie analizie poddawane są modele elementów skończonych. Przedstawione powyżej zalety sprawiają, że algorytmy analizy dróg rozchodzenia się energii w konstrukcjach są przydatnym narzędziem przy ocenie poziomu drgań i hałasu w konstrukcjach.

## Literatura

- [1] CADA-X Transfer Path Analysis Manual, Revision 3.5, LMS International, Leuven, Belgium, [http://www.lmsintl.com], June 2000.
- [2] Esparcieux P., Gaeta M., Noise and vibrational source identification techniques and their application to transfer path analysis, Multibody Dynamics in Sweden II, Frostavallen, 2001.
- [3] Lisowski W., Uhl T.: Praktyczne problemy analizy modalnej konstrukcji. Wydawnictwo AGH Kraków 1996.
- [4] Mendrok K., Uhl T., Zastosowanie algorytmów TPA do identyfikacji obciążeń, Materiały VI Szkoły Analizy Modalnej, Wydawnictwo KRiDM AGH Kraków, 2001.
- [5] Plunt J., Strategy for transfer path analysis (TPA) applied to vibro-acoustic systems at medium and high frequencies, Proceeding of 23rd ISMA, Leuven, 1996.
- [6] Romano J., Lopez J. A., Practical Application of Transfer Path Analysis to Resolve Structure-Borne Noise Problems in Vehicle Design, Proceeding of 21st ISMA, Leuven, 1996
- [7] Silva J. M. M., Maia N. M. M., Modal analysis and testing, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1999.
- [8] SPID - project description, [http://www.inria.fr], 2002.
- [9] Uhl T., Komputerowo wspomaganą identyfikacją modeli konstrukcji mechanicznych, WNT Warszawa 1997.
- [10] Uhl T., Lisowski W., Kurowski P.: In-Operation modal analysis and its applications, Wydawnictwo AGH, Kraków 2001.
- [11] Uhl T., Lisowski W., Mendrok K., Chudzikiewicz A., Vibration energy flow analysis in vehicles with use of the TPA method in application to structural modification, Machines Dynamic Problems, Vol. 26, No. 2/3, 2002
- [12] Uhl T., Kurowski P., Zastosowanie środowiska MATLAB i SigLab do analizy sygnałów, CCATIE Kraków 1998.
- [13] Using Matlab Version 6, The MathWorks, Natick, MA, USA, [http://www.mathworks.com], 2000.

**Title:** Transfer path analysis as modern technique in experimental assessment of means of transport safety and comfort.