

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Eksperymentalno-numeryczna analiza modalna płyt bocznych kadłuba transportera opancerzonego

Zdzisław Hryciów, Piotr Rybak, Andrzej Wiśniewski

Zakład Inżynierii Pojazdów i Transportu, Instytut Pojazdów i Transportu  
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna  
email: zdzislaw.hryciow@wat.edu.pl, piotr.rybak@wat.edu.pl, wisniewski.andrzej@wat.edu.pl

**STRESZCZENIE:** Płyty boczne mogą być narażone na działanie pocisków kinetycznych jak i ładunków wybuchowych umiejscowionych obok pojazdu. Może być do nich mocowane jego wyposażenie, opancerzenie oraz siedziska załogi. Badania eksperymentalne wykonano z wykorzystaniem ośmiokanałowego analizatora Sirius, do którego podłączono młotek modalny oraz siedem piezoelektrycznych akcelerometrów mierzących drgania wzbudzonej płyty. Badania oparto o analizę modalną z wykorzystaniem metody ruchomego młotka, którym wzbudzano drgania badanej struktury. Dla zarejestrowanych sił wymuszających i drgań płyty wyznaczono funkcje przejścia i obliczono funkcję MIF, pomocną w identyfikacji częstotliwości drgań własnych. W przypadku badań numerycznych rozwiązano uogólnione zagadnienie na wartości własne dla przygotowanego modelu kadłuba, zbudowanego z około 145 tysięcy elementów powłokowych. Pozyskane dane stanowią podstawę do walidacji modelu numerycznego kadłuba. W celu porównania zgodności porównywanych postaci drgań własnych obliczono wskaźnik MAC, a dla skojarzonych z nimi częstotliwości, błąd względny. W obu przypadkach uzyskano dobrą zgodność wyników, pozwalającą na walidację modelu numerycznego kadłuba w obszarze jego płyt bocznych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** transporter opancerzony, drgania, analiza modalna, metoda ruchomego młotka

#### 1. Wstęp

Współcześnie, podczas konstruowania wozów bojowych dąży się do modułowej budowy, która umożliwi wdrożenie różnych wersji dostosowanych do planowanych zadań, a ich konstrukcja, wyposażenie i osiągi determinowane są przewidywanym przeznaczeniem.

Powszechną praktyką stosowaną przez ośrodki naukowe i badawcze przy tworzeniu nowych konstrukcji jest podejście numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Metody numeryczne pozwalają na analizę np. wpływu różnych wariantów konfiguracji osprzętu jak i opancerzenia na stopień ochrony załogi [1] i wyposażenia oraz własności trakcyjne i eksploatacyjne.

Aby zapewnić wiarygodność otrzymywanych wyników badań, niezbędne jest przeprowadzenie walidacji modelu numerycznego. W literaturze prezentowane jest w tym zakresie różne podejście. Najbardziej wiarygodnym jest prowadzenie badań eksperymentalnych na obiektach rzeczywistych w pełnej skali. Cennych informacji o właściwościach dynamicznych obiektów technicznych dostarcza analiza modalna. Znajduje ona zastosowanie w wielu dziedzinach techniki. Umożliwia także walidację modeli numerycznych [2].

Z punktu widzenia realizowanej pracy szczególnie ważną jest płyta boczna kadłuba. Jest ona bowiem w bezpośredni sposób narażona na działanie pocisków kinetycznych jak i ładunków wybuchowych umiejscowionych z boku. Do tych płyt umocowane jest wyposażenie pojazdu, jego dodatkowe opancerzenie, a także siedziska załogi w przedziale desantowym.

Celem niniejszej pracy była walidacja modelu w obszarze płyt bocznych. Została ona przeprowadzona w oparciu o wyniki analizy modalnej. Zarówno dla płyty bocznej kadłuba rzeczywistego pojazdu jak i jego modelu numerycznego wyznaczone zostały podstawowe częstotliwości i postaci drgań własnych.

#### 2. Metodyka badań

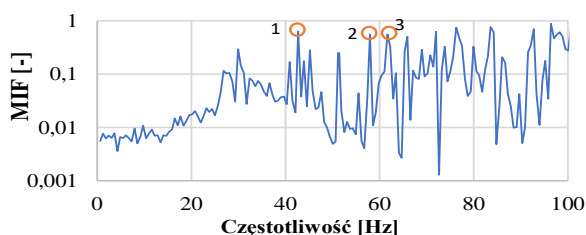
W badaniach wykorzystano eksperymentalną analizę modalną. Pozwala ona na wyznaczenie częstotliwości drgań własnych i odpowiadających im postaci drgań oraz określenie współczynników tłumienia obiektów.

Do badań wykorzystano młotek modalny B&K typ 4395 oraz siedem piezoelektrycznych akcelerometrów. Układ pomiarowo-rejestrujący uzupełniał 8-kanałowy analizator Sirius oraz komputer z oprogramowaniem Na płycie wyznaczono 108 punktów pomiarowych, które kolejno wzbudzano skupioną siłą pochodzącą od uderzeń młotka modalnego. System Dewesoft w czasie rzeczywistym rejestrował i analizował sygnały wejściowe i wyjściowe obliczając funkcje przejścia ( $TF$ ), na podstawie których obliczono (1) wartość funkcji MIF (Mode Indicator Function):

$$MIF = 1 - \left( \frac{\sum_{i,j=1}^n \text{Real}(TF_{ij}(\omega)) \cdot |TF_{ij}(\omega)|}{\sum_{i,j=1}^n |TF_{ij}(\omega)|^2} \right) \quad (1)$$

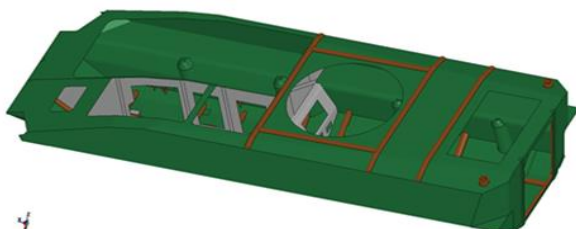
Wartość funkcji MIF bliska wartości 1 oznacza wystąpienie częstotliwości drgań własnych i stowarzyszonej z nią postacią drgań. Na rys. 1 przedstawiono wykres funkcji MIF

uzyskany dla jednego z badań eksperymentalnych. Z zaznaczonymi zidentyfikowanymi częstotliwościami drgań własnych. Pomarańczowymi okręgami numerowanymi od 1-3 zaznaczono zidentyfikowane częstotliwości drgań własnych dla badanej płyty.



Rys. 1. Wykres funkcji MIF z wskazanymi trzema częstotliwościami drgań własnych

W celu określenia częstości i postaci drgań własnych zbudowany został model numeryczny kadłuba transportera. Składa się on z około 145 tysięcy elementów powłokowych. Oprócz samych płyt kadłuba uwzględniono w nim również występujące w konstrukcji wzmocnienia, wsporniki przeznaczone do montażu wyposażenia, jak również otwory konstrukcyjne i technologiczne. Wszystkie to elementy wpływają w istotny sposób na sztywność konstrukcji, a tym samym na jej drgania. Model kadłuba pojazdu przedstawiono na rys. 2. Szczegółowy opis metodyki porównywania postaci drgań przedstawiono w pracach [3, 4], których celem była walidacja modelu kadłuba w obszarze dolnej i górnej płyty w przedziale transportowym.



Rys. 2. Model kadłuba

W celu porównania różnic pomiędzy wyznaczonymi w wyniku badań eksperymentalnych i modelowych postaciami drgań własnych zastosowano Modal Assurance Criterion (MAC). Może być ono wyznaczone za pomocą równania (2):

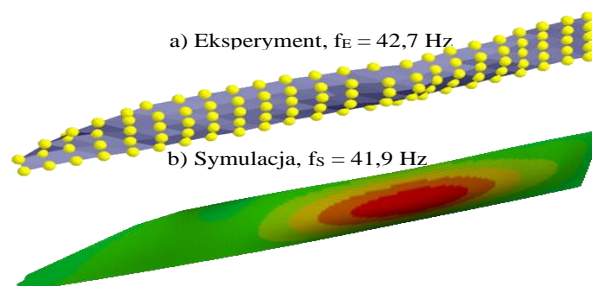
$$MAC(i,j) = \frac{|\{\Psi_e\}_i^T \{\Psi_s\}_j|^2}{(\{\Psi_e\}_i^T \{\Psi_e\}_i)(\{\Psi_s\}_j^T \{\Psi_s\}_j)} \quad (2)$$

W równaniu tym  $\Psi_e$  jest wektorem postaci drgań uzyskanym z badań eksperymentalnych, natomiast  $\Psi_s$  z badań symulacyjnych. Wartość MAC bliska 0 oznacza, że pomiędzy postaciami nie istnieje podobieństwo. Wartość MAC równa 1 oznacza, że dwa porównywane wektory postaci są identyczne.

### 3. Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono wartości częstości drgań własnych i stowarzyszone z nimi

postacie drgań płyty bocznej kadłuba. Dane te posłużyły do wykonania analizy porównawczej z wynikami przeprowadzonych analiz numerycznych. Na rysunku 3 przedstawiono pierwszą postać drgań. Otrzymane wyniki wyraźnie wskazują na dużą zbieżność pomiędzy wynikami z eksperymentu, a wynikami z analiz numerycznych.



Rys. 3. Pierwsza postać drgań własnych: a) eksperymentalna analiza modalna, b) badania numeryczne

Obliczone wskaźniki MAC dla porównywanych postaci przekroczyły wartość 0,8, co świadczy o dobrej zgodności porównywanych postaci.

W tabeli 1 zestawiono częstotliwości drgań własnych płyty bocznej dla trzech pierwszych postaci drgań. Dodatkowo, obliczono różnicę pomiędzy wynikami badań symulacyjnych ( $f_s$ ) i eksperymentalnych ( $f_e$ ). Uzyskano dużą zgodność wyników.

Tabela 1. Częstotliwości drgań własnych

Postać	$f_e$ [Hz]	$f_s$ [Hz]	$\delta$ [%]
1	42,7	41,9	1,87
2	58,0	56,4	2,76
3	61,6	59,4	3,57

### 4. Podsumowanie

Wykonano badania eksperymentalne oraz numeryczne dotyczące identyfikacji częstotliwości i postaci drgań własnych płyt bocznych kadłuba. Badania eksperymentalne oparto o eksperymentalną analizę modalną opartą o tzw. metodę ruchomego młotka. W przypadku badań numerycznych rozwiązano uogólnione zagadnienie na wartości własne. W wyniku badań eksperymentalnych i modelowych:

- 1) wyznaczono podstawowe postacie drgań bocznej płyty kadłuba transportera opancerzonego,
- 2) uzyskano dobrą zgodność porównywanych postaci drgań (wartości wskaźnika MAC > 0,8),
- 3) obliczona różnica względna wyznaczonych częstotliwości drgań własnych dla porównywanych postaci nie przekroczyła 4%.

### Literatura

- [1] Sławiński G., Malesa P., Swierczewski, M. *Analysis Regarding the Risk of Injuries of Soldiers inside a Vehicle during Accidents Caused by Improvised Explosive Devices*, Appl. Sci, 9, 4077, 2019.
- [2] Jambovane S.R., Kalsule D.J., Athavale S.M., *Validation of FE Models Using Experimental Modal Analysis*, SAE Technical Papers, T. 2001-Janua, 2001.
- [3] Hryciów Z., Wiśniewski A., Rybak, P., *Experimental and Numerical Modal Analysis of the Military Vehicle Hull*, Adv. Mil. Technol, 15, pp. 379-391, 2020.
- [4] Hryciów Z., Małachowski J., Rybak P., Wiśniewski A., *Research of Vibrations of an Armoured Personnel Carrier Hull with FE Implementation*, Materials, 14(22):6807, 2021.