

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

3(2)/2014, 21-28

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Michał LISS, Bogdan ŻÓŁTOWSKI

**ANALIZA MODALNA JAKO METODA DIAGNOZOWANIA
STANU NADWOZI SAMOCHODÓW OSOBOWYCH**

Streszczenie: W pracy przeanalizowano możliwości identyfikacji stanu technicznego nadwozi samochodów osobowych, mając na uwadze negatywny wpływ procesów degradacji konstrukcji. Przedstawiono propozycję metody diagnostycznej opartej na analizie modalnej.

Słowa kluczowe: diagnozowanie, analiza modalna, degradacja stanu nadwozia

1. WPROWADZENIE

Nadwozie jest jednym z najważniejszych zespołów w samochodach osobowych tak pod względem wizualnym, funkcjonalnym, jak również technicznym. W aspekcie technicznym nadwozie samochodów osobowych pełni odpowiedzialną funkcję struktury nośnej, do której mocowany jest zespół napędowy, układ kierowniczy, układ zawieszenia itp. Istotne jest również to, aby struktura nadwozia zapewniała wysoki poziom bezpieczeństwa kierowcy oraz pasażerom znajdującym się wewnątrz pojazdu. Aby sprostać tym wymaganiom, producenci samochodów modernizują nadwozia samonośne pod względem rozwiązań konstruktorskich oraz materiałowych.

Jednym z pierwszych rozwiązań zwiększających bezpieczeństwo w samochodach było zastosowanie tzw. stref zgniotu (gradacji sztywności). Innym rozwiązaniem współcześnie bardzo popularnym jest stosowanie nowoczesnych materiałów (aluminium, tworzyw sztucznych itp.) wykorzystywanych do produkcji elementów nadwozia. Niemniej jednak produkcja nadwozia samonośnego nie zmieniła się aż tak bardzo i w dalszym ciągu wykonuje się je z tłoczonych cienkich blach o zmiennych profilach, zgrzewanych punktowo oraz odpowiednio zabezpieczanych antykorozyjnie.

Mając powyższe na uwadze, nie trzeba zastanawiać się nad aspektem bezpieczeństwa w nowo wyprodukowanych pojazdach. Problem pojawia się wtedy, gdy pojazd samochodowy jest eksploatowany przez dłuższy czas. W trakcie eksploatacji konstrukcja pojazdu zostaje nie tylko poddawana różnym zmiennym obciążeniom wynikającym na przykład ze złego stanu dróg, ale również

mgr inż. Michał LISS, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: michal.liss@utp.edu.pl
prof. dr hab. inż. Bogdan ŻÓŁTOWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: bogdan.zoltowski@utp.edu.pl

jest wystawiona na innego rodzaju czynniki (np. korozję, zmęczenie, zużycie itp.), przyczyniające się do postępowania procesu degradacji. Powoduje to, że stan techniczny takiego pojazdu może nie zapewniać już tak dużego bezpieczeństwa, jak miało to miejsce na samym początku jego eksploatacji. Mogą się również zdarzyć sytuacje, w których samochody powypadkowe po odpowiednich procesach naprawczych, nie zawsze przywracających pełne bezpieczeństwo, są dopuszczane do ruchu drogowego. Pojawia się zatem pytanie: jak w takich przypadkach wystarczająco miarodajnie ocenić stan techniczny pojazdów, aby mogły ponownie uczestniczyć w ruchu drogowym. Obecne metody diagnozowania struktury nośnej pojazdów opierają się w znacznym stopniu jedynie na organoleptycznej ocenie jej stanu, zatem jego wyniki w kwestiach wytrzymałości, trwałości, a tym samym poziomu bezpieczeństwa zarówno samego kierowcy, jak i pozostałych uczestników ruchu drogowego obarczone są dużym błędem.

2. PROCESY DEGRADACJI STRUKTURY NADWOZIA

Bez wątpienia jednym z najbardziej popularnych procesów niszczących konstrukcje nośne samochodów osobowych jest korozja. Warunki klimatyczne w Polsce sprzyjają rozwojowi korozji w nadwoziach. Mają na to bezpośredni wpływ takie parametry klimatyczne, jak:

- średnie temperatury zimowe,
- względna wilgotność powietrza,
- obciążenie środowiska substancjami chemicznymi (przykładem może być jon chlorku pochodzący z soli wykorzystywanej do zwalczania śliskości na drogach zimą).

Istotne zatem staje się również poznanie odporności korozyjnej nadwozi pojazdów w tak agresywnym środowisku. Informacje na ten temat mogą zostać zdobyte dzięki realizacji odpowiednich badań [1-4].

Najprostsze badanie, jakie jest wykonywane w każdym warsztacie samochodowym bądź w stacji kontroli, opiera się na bezpośrednich wizualnych obserwacjach, które przy zastosowaniu odpowiednich wskaźników pozwalają dokonać oceny stopnia skorodowania [4]. Punktem wyjścia do określenia kryteriów oceny jest klasyfikacja funkcjonalności elementów nadwozia, których korozja uznana została za czynnik istotny pod względem bezpieczeństwa, oraz sposób wyznaczenia stopnia uszkodzenia. W zależności od klasy funkcjonalności elementu i stopnia jego skorodowania podejmuje się odpowiednie decyzje w procesie diagnozowania. Metody te są jednak mało obiektywne, ponieważ wynik diagnozy w znacznym stopniu zależy od subiektywnej oceny diagnosty [2, 4].

Stopień skorodowania konstrukcji nośnej samochodu osobowego, określony przez diagnostę, pozwala jedynie ustalić poziom zaawansowania procesów korozyjnych, nie daje natomiast żadnego odniesienia do jego stanu technicznego.

Wszelkiego rodzaju procesy niszczące, takie jak zmęczenie materiału czy korozja, przejawiają się zmianami w geometrii i topologii konstrukcji [2]. Powstają nieciągłości materiału, defekty, które polegają na wypadaniu pewnych elementów czy węzłów. Zniszczenie w takiej postaci odbija się na własnościach dynamicznych konstrukcji, a więc również na macierzy sztywności, masy i tłumienia. Zaburzenie tych własności może spowodować zmianę sił wewnętrznych w nadwoziu, w związku z czym konstrukcja ta może stracić stateczność lub nawet mieć tendencję do uplastycznienia się.

Pracę całej konstrukcji lub jej części można ocenić na podstawie stanów granicznych: nośności, przystosowania i użytkowania [1, 3]. Stan granicznej nośności konstrukcji występuje wtedy, gdy w strukturze tworzą się globalny lub lokalne mechanizmy ruchu dla całej konstrukcji przy jednoczesnym zachowaniu geometrycznej niezmienności pozostałych części konstrukcji [1, 3].

O stanie granicznym przystosowania mówi się wówczas, gdy konstrukcja wchodzi w fazę pracy sprężysto-plastycznej, tzn. przynajmniej jeden jej element ulega odkształceniu plastycznemu. Dla danej wartości obciążenia konstrukcja się przystosowuje, tzn. gdy jest odciążana, przy następnym cyklu nie ma przyrostu odkształceń trwałych, jeżeli nie przekroczy się danego obciążenia. Zmalałe sztywność konstrukcji, ponieważ część jej elementów weszła w krytyczny obszar pracy i ich sztywność zmniejszyła się, a więc zmalała też sztywność całej konstrukcji [1, 3].

Stan graniczny użytkowania przejawia się najczęściej nadmierną propagacją drgań, nadmiernymi przemieszczeniami, odkształceniami czy też innymi negatywnymi zjawiskami wynikającymi ze specjalnych funkcji konstrukcji [2, 3].

Efektom przyrostu uszkodzeń w nadwoziu samochodu na skutek działania czynników destrukcyjnych jest spadek jego sztywności. Bezwzględny spadek tej sztywności może spowodować osiągnięcie minimalnej dopuszczalnej wartości, która jest jednocześnie granicznym stanem użytkowania. Istotne jest również to, aby określić wartość spadku sztywności konstrukcji w stosunku do jej sztywności początkowej. Takie podejście umożliwiłoby ocenę stopnia degradacji całej konstrukcji, jak i również tych partii, które w znacznym stopniu przyczyniają się do przyjmowania obciążeń zewnętrznych w konstrukcji nośnej oraz tych, które są istotne ze względu na rozprowadzanie w konstrukcji obciążeń wewnętrznych.

Wydaje się zatem, że aby poprawnie ocenić stan takiej konstrukcji w aspekcie bezpieczeństwa, należy mieć wiedzę z zakresu:

- właściwości mechanicznych materiałów,
- wymiarów geometrycznych,
- obciążeń konstrukcji i ich źródeł itp.

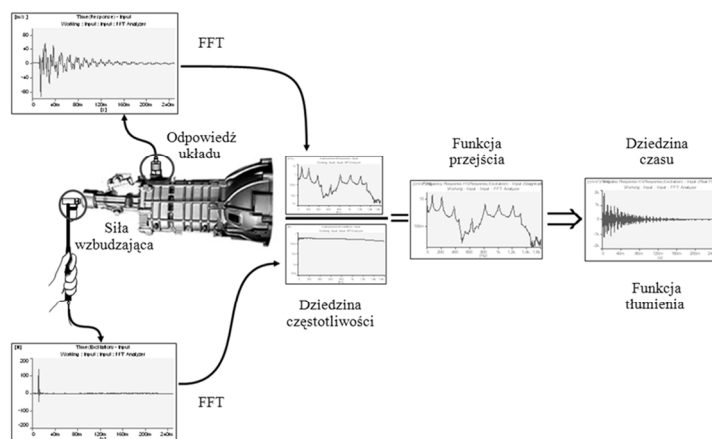
Określenie zmian własności materiałowych, struktury i rozkładu obciążeń w takiej konstrukcji jak nadwozie, z uwzględnieniem również potencjalnych defektów, które mogą się w tej strukturze znaleźć, okazuje się być bardzo trudne.

W takim przypadku rozwiązaniem, które umożliwi poznanie własności konstrukcji nadwozia pojazdów samochodów osobowych, mogą być badania wykorzystujące metody analizy modalnej.

3. METODY ANALIZY MODALNEJ

Współcześnie badanie własności dynamicznych konstrukcji mechanicznych z wykorzystaniem metod analizy modalnej jest bardzo powszechne. Celem tej analizy jest otrzymanie informacji o obiekcie w formie tzw. modelu modalnego, na który składają się postacie drgań własnych, częstotliwości drgań własnych oraz współczynników tłumienia, masy i sztywności dynamicznej. Mają one główny wpływ na drgania układu, emitowany hałas, wytrzymałość zmęczeniową, sterowność oraz stabilność konstrukcji. Metoda analizy modalnej dzieli się na [5, 6]:

- eksperymentalną – wymagającą sterowanego eksperymentu identyfikacyjnego, podczas którego wymusza się ruch obiektu (np. drgania) oraz dokonuje pomiaru wymuszenia i pomiaru odpowiedzi w wielu punktach pomiarowych rozmieszczonych na badanym obiekcie (rys. 1),



Rys. 1. Schemat eksperymentalnej analizy modalnej
Fig. 1. Diagram of experimental modal analysis

- eksploatacyjną – opierającą się na eksperymencie eksploatacyjnym, w którym dokonuje się jedynie pomiarów odpowiedzi układu w wielu punktach pomiarowych, podczas gdy ruch obiektu spowodowany jest rzeczywistymi wymuszeniami eksploatacyjnymi,
- teoretyczną – wymagającą rozwiązania zagadnienia własnego dla przyjętego modelu strukturalnego badanego obiektu.

Analiza dynamiki nadwozia jest możliwa do wykonania albo na podstawie modelu strukturalnego (np. Metoda Elementów Skończonych), albo za pomocą odpowiednich badań na rzeczywistym obiekcie. W pracy przedstawiono zasto-

sowanie eksperymentalnej analizy modalnej, opierając się na modelu nadkola pojazdu Peugeot 306 (rys. 2).



Rys. 2. Nadkole z pojazdu osobowego Peugeot 306
Fig. 2. Wheel arch from Peugeot 306

3.1. Zastosowanie eksperymentalnej analizy modalnej

Zastosowanie metody w praktyce wymaga, aby badany układ spełniał odpowiednie warunki i założenia [5]:

- układ jest liniowy i jego dynamika może być opisana za pomocą liniowego układu równań różniczkowych zwyczajnych lub cząstkowych. Z założenia o liniowości układu można sformułować zasadę superpozycji układu,
- układ spełnia zasadę wzajemności Maxwella, w rezultacie czego otrzymuje się symetryczne macierze mas, sztywności, tłumienia oraz charakterystyk częstotściowych,
- tłumienie w układzie jest małe lub proporcjonalne do masy lub sprężystości,
- układ jest obserwowalny i istnieje możliwość pomiarów wszystkich charakterystyk, których znajomość jest niezbędna do znajomości modelu.

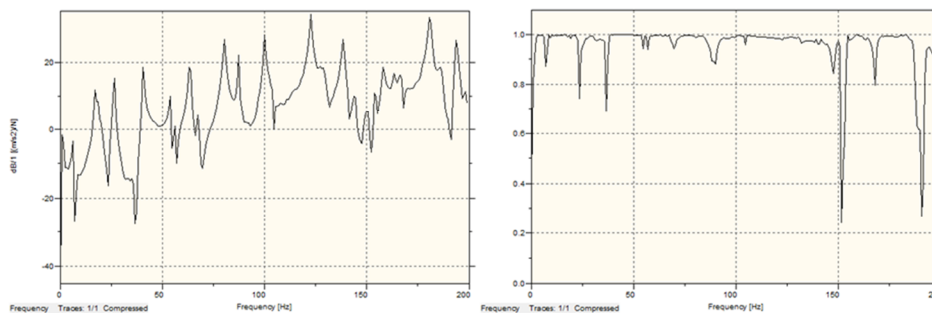
Jeżeli warunki zostały spełnione, można przejść do badania analizowanej struktury, pobudzając ją do drgań wymuszeniem impulsowym. Takiego rodzaju wymuszenie może zostać zadane młotkiem modalnym bądź wzbudnikiem drgań. Na rysunku 3 przedstawiono mocowanie czujnika odpowiedzi oraz sposób wymuszania konstrukcji młotkiem modalnym.



Rys. 3. Przykład eksperymentu analizy modalnej
Fig. 3. Example of modal analysis research

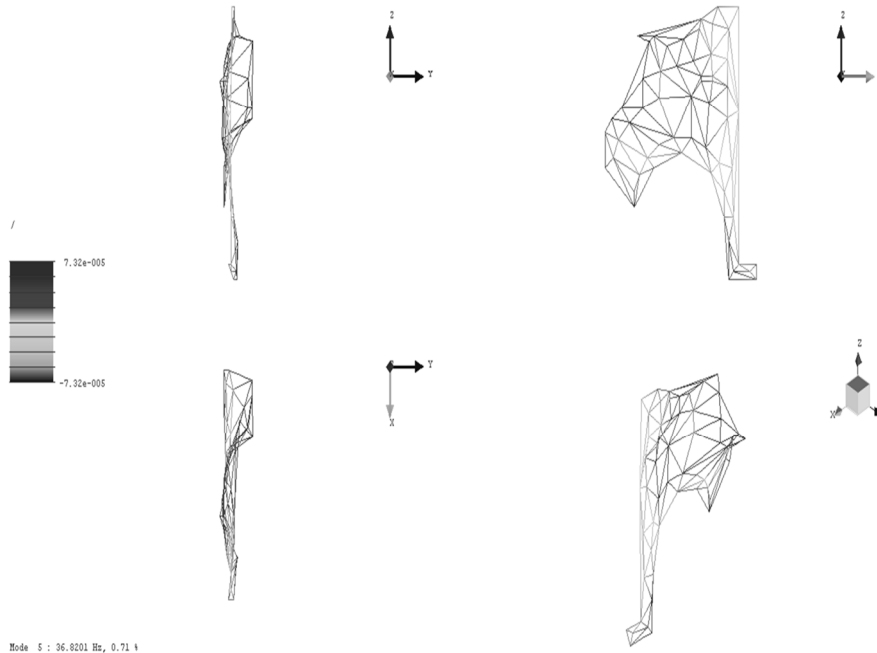
Reakcja nadkola na to wymuszenie jest mierzona czujnikiem przyspieszeń drgań. W trakcie pomiaru drgań wraz ze wzrostem częstotliwości wymuszenia następują zmiany amplitudy w punkcie pomiarowym.

Pomimo stałej w czasie siły wymuszającej, odpowiedź układu na zadane wymuszenie wzmacnia się w niektórych częstotliwościach nadkola, aż do momentu osiągnięcia pełnej zgodności pomiędzy częstotliwością wymuszenia a jego częstotliwością rezonansową. Przetworzenie sygnału czasowego na sygnał częstotliwościowy za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT) pozwala na wyznaczenie tzw. widmowej funkcji przejścia (FRF). Taka postać sygnału umożliwia znacznie prostszą formę wyznaczania częstotliwości rezonansowych obiektu (rys. 4). Wyznaczenie tych częstotliwości jest jeszcze prostsze, jeżeli nałoży się na wykres FRF wykres koherencji.



Rys. 4. Wykres (od lewej) widmowej funkcji przejścia FRF oraz wykres funkcji koherencji COH
Fig. 4. Diagram (from left) of FRF and coherence function COH

Postacie drgań badanej struktury przyjmują różne formy w zależności od częstotliwości wymuszenia. Każda z naturalnych dla badanej struktury częstotliwości rezonansowych odpowiada określonej postaci drgań, które często są nazywane również modami wibracji (rys. 5).



Rys. 5. Postacie drgań własnych nadkola jako odpowiedź na zadane wymuszenie
 Fig. 5. Mode shape of wheel arch as a response at excitation

Poszczególne mody wibracji mogą mieć odmienny charakter: skrętny, giętny oraz giętno-skrętny. Położenie częstotliwości własnych i postacie drgań własnych wynikają z właściwości badanej struktury, opisaną przez parametry takie jak masa, sztywność oraz tłumienie.

4. PODSUMOWANIE

Problem degradacji konstrukcji nośnej samochodów osobowych na polskich drogach w dalszym ciągu nie traci na znaczeniu. Wpływ mają na to nie tylko trudne warunki klimatyczne panujące w Polsce, ale również preferencje użytkowników pojazdów, którzy są zainteresowani w znacznej mierze samochodami po ponad 10-letnim okresie eksploatacji, jak również samochodami powypadkowymi, w których procesy naprawcze mają istotny wpływ na właściwości dynamiczne elementów. W tego typu pojazdach degradacja nadwozia w znacznym stopniu następuje na skutek działania procesów korozyjnych. W związku z tym pojawia się kolejny problem związany z oceną stopnia korozji, opierającą się w dalszym ciągu jedynie na metodach organoleptycznych.

Analizując dostępną literaturę, można zauważyć, że powstało kilka rozwiązań tego problemu, natomiast zaproponowane metody nadal są bardzo skomplikowane i trudne do zrealizowania podczas obowiązkowego prostego przeglądu technicznego.

Próba zastosowania w tym celu metod analizy modalnej może rzucić zupełnie nowe światło na zaistniały problem, a nawet stać się realnym rozwiązaniem, możliwym również do zastosowania codziennego.

LITERATURA

- [1] ŁUBIŃSKI M.: Konstrukcje metalowe. Arkady, Warszawa 1986.
- [2] PAWŁOWSKI B.: Wybrane aspekty diagnostyki stanu technicznego nadwozi samochodów osobowych. Archiwum Motoryzacji 3-4, 1998, 91-99.
- [3] ROMANOV F.: Wytrzymałość ram i nadwozi pojazdów. WKiŁ, Warszawa 1988.
- [4] SITEK K., SYTA S.: Badania stanowiskowe i diagnostyka. WKiŁ, Warszawa 2011.
- [5] UHL T.: Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych. WNT, Kraków 1997.
- [6] ŻÓŁTOWSKI B.: Badania dynamiki maszyn. ATR, Bydgoszcz 2002.

MODAL ANALYSIS AS METHOD OF BODY CAR CONDITION DIAGNOSIS

Summary: This paper presents why we need to identify the technical condition of body cars whereas a negative impact degradation processes and proposes a diagnostic method based on modal analysis.

Key words: diagnosis, modal analysis, degradation body state