

Prof. dr hab. inż. Józef Gawlik
Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny
Katedra Inżynierii Procesów Produkcyjnych

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Lissa nt.: „**Ocena zmian sztywności struktur nośnych pojazdów metodą analizy modalnej**”

Promotor: Prof. dr hab. inż. Bogdan Żółtowski, dr h.c.

Podstawa opracowania: pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy z dnia 21.12.2017 r.

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa, wydana w formie książki obejmuje 162 strony, a w tym: 1 strona spisu treści, 3 str. wykazu ważniejszych oznaczeń, 8 str. spisu literatury (130 pozycji), 2 str. streszczeń (w j. polskim i j. angielskim), 33 str. załączników. Praca składa się z 8 rozdziałów.

Należy z uznaniem podkreślić, że rozprawa zawiera obszerny, udokumentowany i starannie przygotowany pod względem edytorskim materiał badawczy. W wykazie literatury jest 13 pozycji, których współautorem jest Doktorant, co świadczy o tym, że wyniki tych prac były także wielokrotnie poddawane publicznej ocenie.

We wstępie - rozdział 1 Autor przedstawia genezę rozprawy, zwracając uwagę na istotne wymagania, które musi spełniać konstrukcja nośna pojazdu. Stwierdza m. in., że „... *te bardzo odpowiedzialne zadania z punktu widzenia niezawodności i bezpieczeństwa są weryfikowane w trakcie eksploatacji środków transportu, kiedy to stykają się z koniecznością przenoszenia przez te pojazdy rzeczywistej formy obciążeń mających charakter losowy*”. W świetle tego stwierdzenia diagnostyka oraz monitorowanie stanu technicznego pojazdu i wcześniejsze wykrycie mogących pojawić się uszkodzeń są istotnymi działaniami w procesie odpowiedzialnej eksploatacji środków transportu.

Następnie Autor rozprawy przedstawia krótką charakterystykę stosowanych metod pomiarowych, które są stosowane do diagnozy i wspomaganie oceny stanu technicznego pojazdów. Szczególną uwagę zwrócił Doktorant na metody modalne z uwagi na możliwość ich wykorzystania do monitorowania obiektów o złożonej geometrii, Do takich obiektów należą także konstrukcje nośne pojazdów samochodowych i kolejowych.

Biorąc pod uwagę znaczenie dla poszerzenia wiedzy w dyscyplinie „Budowa i Eksploatacja Maszyn” oraz zakresu potencjalnych, przemysłowych zastosowań wyników pracy, wybór tematu rozprawy doktorskiej uznaję za trafny i w pełni uzasadniony do podjęcia.

W rozdziale 2 zostały przedstawione wybrane zagadnienia dotyczące konstrukcji, obciążeń i stosowanych metod oceny stanu struktur nośnych pojazdów. Konstrukcja nośna pojazdu powinna zapewnić przeniesienie obciążeń statycznych, a także dynamicznych w czasie jazdy. Doktorant przedstawił przykłady sił działających na konstrukcję nośną pojazdu samochodowego dla różnych przypadków obciążeń wynikających z ukształtowania nawierzchni drogowej (rys.2.3 – rys.2.7). Analizując sztywność struktur nośnych pojazdów Doktorant bazuje głównie na publikacji F. Romanowa: *Wytrzymałość ram i nadwozi pojazdów, WKiŁ, Warszawa 1998*. Przedstawia przykłady profili możliwych do zastosowania w konstrukcjach nośnych pojazdów oraz stosowne wzory do wyznaczenia stanu naprężeń i odkształceń tych konstrukcji pod działaniem zewnętrznych obciążeń.

Uwagi: Doktorant pisze, że:

- „konstrukcje cienkościenne cechuje duży stosunek sztywności do ciężaru własnego” (s.15). Mówiąc „duży stosunek” należałoby podać przynajmniej jakiego rzędu jest ta wartość; ponadto wg mnie powinno być: ... stosunek sztywności do masy, a nie do „ciężaru własnego”;
- zamiast sformułowania „... masy fikcyjne...” (s.20), powinno być: ... masy zredukowane..., lub masy zastępcze.

W pełni zgadzam się z uwagami Autora rozprawy, odnoszącymi się do metod oceny stanu konstrukcji nośnej pojazdu, stosowanymi na stacjach diagnostycznych. Stwierdzenie braku wycieków płynów technologicznych oraz poprawności cech geometrycznych nie daje odpowiedzi, czy np. korozja wewnętrzna (międzykrystaliczna) nie stanowi zagrożenia dla niezawodnej eksploatacji pojazdu. Dlatego też wywód końcowy zawarty w tym rozdziale, iż „spadek sztywności w strukturze nośnej lub jakiegokolwiek zmiany tej sztywności mogą być zatem dobrym symptomem, obrazującym stan techniczny konstrukcji nośnej oraz przydatnym parametrem diagnostycznym w jej ocenie” uznaję za właściwy i uzasadniony do głębszej analizy.

Rozdział 3 zawiera uzasadnienie podjęcia tematu, hipotezę, cel główny pracy oraz cele szczegółowe. Sformułowana hipoteza, cele rozprawy i dwa główne zadania, tj.:

- „wykazanie w wyznaczonych charakterystykach oraz parametrach modalnych z wykorzystaniem metodyki badawczej opartej wybranej metodzie analizy modalnej,
- eksperymentalna weryfikacja uzyskanych rezultatów na podstawie przeprowadzonych eksperymentów na kilku obiektach

w celu udowodnienia postawionej hipotezy nie budzą wątpliwości.

Uwaga: śledząc przedstawione szczegółowe cele pracy (s.28), nasuwa się pytanie: co w tym przypadku mieści się pod pojęciami: *sposób identyfikacji, metodyka badawcza oraz metodologia badawcza* ?

Rozdziały 4 – 5 są kontynuacją analizy publikacji z uwagi na sformułowany cel i zakres badań przewidzianych do zrealizowania w ramach rozprawy. W rozdziale 4 Doktorant omawia bezzwzględne metody oceny stanu konstrukcji, ujmując je syntetycznie na rys.4.1.

Uwaga: czy rys.4.1. jest rzeczywiście „podziałem metodologicznym” ?

Analizując poszczególne metody (s.30 – s.37) zwraca uwagę logika i zwięzłość ich opisu przez Doktoranta, a należy podkreślić, że literatura dotycząca tej tematyki jest dość obszerna. W tej problematyce mieści się także analiza modalna (m. in. modalny współczynnik tłumienia, filtr modalny).

Rozdział 5 – modalna analiza stanu konstrukcji mechanicznej (s.38 -s.55) zawiera metodologiczne podstawy rozprawy doktorskiej. Doktorant na podstawie analizy literatury formułuje szereg matematycznych modeli, które opisują stan konstrukcji, tj.: sztywność układu mechanicznego charakteryzowaną za pomocą podatności dynamicznej – funkcji przejścia, wyznaczone wielkości: impedancję i inertancję, częstości drgań własnych (nietłumionych i tłumionych), współczynnik tłumienia, odpowiednie dla tych wielkości zapisy w postaci macierzowej. Podobnie przedstawia problemy i algorytm estymacji parametrów modalnych za pomocą metody PolyMAX z zastosowaniem nieliniowej metody najmniejszych kwadratów. Wskazuje też na możliwość zastosowania metod dokładnych lub iteracyjnych.

Istotą proponowanej procedury oceny zmian sztywności na podstawie modelu modalnego jest współzależność pomiędzy lokalną zmianą sztywności konstrukcji wskutek uszkodzeniem a postacią parametrów modalnych tego modelu. Porównanie modelu konstrukcji bez uszkodzenia z modelem tego obiektu po określonym czasie eksploatacji wskazuje na zaistnienie

uszkodzenia (lub jego brak). Przebieg eksperymentalnej analizy modalnej został przedstawiony na rys.5.3.

W analizie tej części rozprawy doktorskiej starałem się w bardzo skrótowy sposób scharakteryzować kolejne kroki, które podjął Doktorant w celu rozwiązania postawionego problemu badawczego, nie wnikając w szczegóły matematycznego modelowania. Stwierdzam, że Doktorant zwięźle i rzeczowo dokonał analizy zagadnienia na podstawie dobrze dobranej, reprezentatywnej literatury. Podsumowując tę część opracowania stwierdzam, że **mgr inż. Michał Liss wykazał, iż opanował na wymaganym poziomie umiejętność analizy i syntezy złożonych problemów badawczych, czym potwierdził także dobre przygotowanie do pracy naukowej.**

Zaproponowaną koncepcję badań oceniam w pełni pozytywnie.

Uwaga: w podpisie pod rys.5.5 jest stwierdzenie „*źródło własne*”, a z kolei identyczny schemat jest między innymi zamieszczony na rys.5.2 z odwołaniem do opracowania T. Uhla. [poz. 113], tj. Co jest zatem właściwe ?

Rozdziały 6 i 7 zawierają wyniki badań własnych Doktoranta. W badaniach wstępnych została zweryfikowana proponowana przez Autora rozprawy analiza modalna na obiektach prostych konstrukcyjnie, ale o cechach zbliżonych do stosowanych w konstrukcjach nośnych pojazdów mechanicznych. Za pomocą zestawionego odpowiedniego stanowiska badawczego (szczegółowy opis stanowiska jest zamieszczony w pracy) układ był pobudzany do drgań poprzez wymuszenie impulsowe. Badaniom były poddane 3 rodzaje kwadratowych profili zamkniętych, tj.: bez połączenia spawanego, z połączeniem spawanym oraz z celowo wprowadzonym uszkodzeniem.

Przeprowadzone eksperymenty wraz z analizą rejestrowanych sygnałów zostały skrupulatnie opisane przez Doktoranta i udokumentowane na licznych wykresach (s.56 – s.78 wraz z rys.6.1 – rys.6.32 i tab.1 – tab.9). W odniesieniu do poszczególnych wyników badań Doktorant zamieszczał też stosowny komentarz i interpretację w odniesieniu do uzyskanych wyników, co dowodzi, że podejmowane działania realizuje w sposób celowy i przemyślany.

Uwaga: w części dotyczącej analizy słusznie Doktorant używa określenia „*częstość*” w odniesieniu do częstości drgań własnych (pojęcie częstości kołowej w wymiarze [1/s]), natomiast w podpisach pod niektórymi rysunkami i tabelami w rozdziale 6 wg mnie powinno być „*częstotliwość*”, ponieważ ta wielkość wyraża liczbę cykli odniesioną do jednostki czasu wyrażoną w [Hz].

Podobny tok postępowania zastosował Doktorant do wyznaczenia parametrów modalnych spawanej, nieuszkodzonej kratownicy (rys.6.35) oraz kratownicy z celowo wprowadzonym uszkodzeniem (punkt 6.4, s.78 – s.94)). Obydwie kratownice były wykonane z kwadratowych profili zamkniętych. Eksperymenty zostały szczegółowo opisane wraz z dyskusją wyników.

Uwagi: na s.88 Doktorant użył sformułowania ... „*dokładnie odwzorowano połączenia, wymiary oraz materiał...*”. Lepiej pominąć słowo „*dokładnie*”, ponieważ w odniesieniu do wymiarów należałoby podać wymiar i tolerancję wykonania, a w odniesieniu do materiału np. strukturę, skład chemiczny, itd. (oczywiście rozumiem intencję Autora rozprawy, ale zwracam uwagę na potoczne znaczenie tak sformułowanego stwierdzenia oraz na dość często używane w pracy słowo „*dokładnie*”).

We wnioskach z przeprowadzonych badań laboratoryjnych na obiektach wzorcowych Doktorant między innymi stwierdził, że:

- częstości drgań własnych, wyznaczonych na podstawie modelu analitycznego (obliczenia wykonano w programie Autodesk Inventor) są porównywalne z odpowiednimi częstościami uzyskanymi na modelowych kratownicach;
- modalny współczynnik tłumienia jest zależny od stanu badanych obiektów, ale nie jest przydatny do identyfikacji konkretnych uszkodzeń;
- najbardziej wrażliwym parametrem na zmiany sztywności konstrukcji i jej uszkodzenia jest częstotliwość drgań własnych.

W rozdziale 7 zostały przedstawione wyniki badań dwóch ram nośnych, stosowanych w pojazdach ciężarowych Star 266. Badania były prowadzone w warunkach terenowych na utwardzonej nawierzchni wg uprzednio przyjętej metodyki, ale z pewną jej modyfikacją. Konieczność modyfikacji metodyki została niejako wymuszona większą złożonością konstrukcji ramy nośnej („...liczne mocowania, dodatkowe podzespoły, płyny eksploatacyjne...”), w której wyniku badany obiekt nie był liniowym z uwagi na badania modalne (wyraźne obniżenie wskaźnika zbieżności wyników do poziomu ok. 61 %). Doktorant utworzył „diagram stabilizacyjny” dla nieuszkodzonego obiektu badań z 36864 widmowych funkcji przejść FRF, który następnie analizował w przedziałach o wybranym zakresie częstotliwości po 256 Hz każdy. Utworzył także model MES badanej ramy nośnej. Na tej podstawie określił 120 postaci drgań własnych w zakresie częstotliwości od 0,7 – 1024 Hz. Po porównaniu wyników uzyskanych z obu modeli modalnych odrzucił te postaci drgań, które nie odpowiadały drganiom strukturalnym ramy nośnej. Wyniki przeprowadzonych badań i analiz zostały stały skomentowane oraz przedstawione na rys.7. – rys.7,19 i w tab. 13.

To bardzo skrótkowe scharakteryzowanie przez mnie obszernych badań oraz ich analizy, zrealizowanych przez Autora rozprawy, daje podstawę do wyrażenia opinii, że opanował On warsztat badawczy na bardzo dobrym poziomie.

Główną część rozprawy zamyka **rozdział 8 – podsumowanie**, w którym zostały zawarte wnioski z przeprowadzonych badań własnych, przy niektóre sformułowania natury ogólnej są raczej oczywiste. Do tych ostatnich zaliczam stwierdzenie, że:

- „na całkowitą sztywność pojazdu składa się w głównej mierze struktura nośna oraz mocowane na niej pozostałe elementy składowe całego poszycia”
- „stacje kontroli pojazdów nie posiadają odpowiednich narzędzi oraz metod diagnostycznych do oceny stanu struktur nośnych pojazdów”.

Natomiast stwierdzenie, że:

- „ proponowana metodyka pomiarowa wykorzystująca metody modalne stanowi innowacyjny sposób identyfikacji ... zwiększając poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego” jest chyba zbyt optymistyczne.

Uwagi:

- o zwiększeniu poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego można mówić, jeśli zostaną ustanowione kryterialne wartości wskaźników jakości konstrukcji, opracowane na podstawie badań Doktoranta i wprowadzone do normatywów oceny diagnostycznej pojazdów;
- jakie jest kryterium rozróżnienia czy konstrukcja jest zaliczana do prostej lub złożonej (por. stwierdzenie nr 5 na s.118).

Za oryginalny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny „Budowa i Eksploatacja Maszyn” uznaje:

- wykazanie, że istnieje istotna zależność pomiędzy zmianami sztywności struktur mechanicznych a parametrami modalnymi;

- stwierdzenie, że złożoność geometryczna obiektu mechanicznego wpływa na postać uzyskiwanych diagramów stabilizacji i wartość estymowanych parametrów modalnych;
- potwierdzenie, że częstość drgań własnych jest najwrażliwszym parametrem modalnym, umożliwiającym określenie zmian sztywności konstrukcji nośnej;
- modalny współczynnik tłumienia nie jest w pełni przydatny do diagnostyki uszkodzeń struktur nośnych (Doktorant stwierdza, że: ... „nie wykazuje podobnych wartościowych cech diagnostycznych...”)

To skrótkowe przedstawienie zakresu wykonanych eksperymentów przez mgr. inż. Michała Lissa upoważnia do wyrażenia opinii, że Jego wiedza i umiejętności prowadzenia badań oraz rozwiązywania złożonych problemów naukowych i inżynierskich, z możliwością ich ukierunkowania na przemysłowe zastosowania, są na bardzo dobrym poziomie.

2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam w pełni pozytywnie**, albowiem zawiera ona merytoryczną analizę metod i modeli stosowanych do identyfikacji charakterystyk sztywności konstrukcji mechanicznych oraz opracowanie i zweryfikowanie poprawności zaproponowanej metody analizy modalnej.

O odpowiednim przygotowaniu Autora rozprawy do prowadzenia prac badawczych świadczą: poprawna merytoryczna analiza i synteza literatury, odpowiednie zastosowanie wiedzy z zakresu planowania i organizacji badań, weryfikacja założeń teoretycznych, umiejętność i na wysokim poziomie opracowanie wyników badań.

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do ważnego i wciąż nie w pełni poznanego obszaru badawczego, związanego z wdrażaniem nowych, innowacyjnych metod diagnostyki konstrukcji mechanicznych. Mgr inż. Michał Liss opanował na wymaganym poziomie współczesne metody organizacji badań i właściwe dla nich narzędzia, służące do rozwiązywania złożonych, wielowariantowych problemów badawczych.

Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie „Budowa i Eksploatacja Maszyn” posiada oryginalne cechy nowości i w perspektywie możliwości zastosowań przemysłowych. Proponuję rozważenie wyróżnienia opiniowanej rozprawy.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgra inż. Michała Lissa nt.: „Ocena zmian sztywności struktur nośnych pojazdów metodą analizy modalnej” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003 r., tekst ujednolicony z dnia 29 września 2014 r. wraz z późniejszymi rozporządzeniami) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**

Kraków, dnia 27 stycznia 2018 r.

