



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Katedra Automatyki i Technik Informatycznych

dr hab. inż. Janusz Góldasz, prof. PK

Kraków, 2018-12-31

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Woźniaka
pt.

“Konfiguracja i walidacja wytrzymałościowa stosów zaworowych amortyzatorów z użyciem modeli numerycznych”

Promotor pracy: dr hab. inż. Piotr CZOP

Podstawa prawna oceny:

Pismo dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej dr. hab. inż. Anny Timofiejczuk, prof. PŚ, z dnia 31 października 2018 r.

1. CEL I ZAKRES ROZPRAWY

W Rozdziale 2.3 Doktorant sformułował dwie główne tezy pracy:

- **Teza główna 1:** Matematyczny nieliniowy model systemu zaworowego stosowany w amortyzatorach hydraulicznych dedykowanych dla pojazdów szynowych, opracowany przez wybór parametrów fizycznych oraz geometrycznych modelu (zmienne projektowe) mających największy wpływ na wyniki analizy numerycznej, pozwala zgodnie z przyjętymi założeniami modelu na odzwierciedlenie działania systemu zaworowego w środowisku numerycznym z użyciem metody elementów skończonych przy możliwie najkrótszym czasie trwania symulacji.
- **Teza główna 2:** Opracowany matematyczny model nieliniowy modelu systemu zaworowego pozwala na numeryczną walidację systemów zaworowych pod kątem wymaganych sił tłumienia oraz wytrzymałości zmęczeniowej (kryteria projektowe).

oraz pięć celów głównych służących wykazaniu przedstawionych cech:

- **Cel 1:** Opracowanie konfigurowalnego modelu przestrzennego dyskowego systemu zaworowego stosowanego w amortyzatorach hydraulicznych dedykowanych dla pojazdów szynowych przy wykorzystaniu komputerowego systemu wspomaganie CAD (Computer Aided Design)
- **Cel 2:** Opracowanie modelu elementów mechanicznych dyskowego systemu zaworowego dla przestrzennych oraz powłokowych elementów skończonych i metody analiz wyników symulacji nieliniowych modeli systemu zaworowego amortyzatora
- **Cel 3:** Przeprowadzenie analizy wrażliwości wyjść nieliniowego modelu elementów mechanicznych systemu zaworowego na zmiany tolerancji rozpatrywanych parametrów geometrycznych oraz fizycznych zaworu (zmiennych projektowych)
- **Cel 4:** Przeprowadzenie wrażliwości wyjścia modelu wytrzymałości zmęczeniowej stosu zaworowego na zmiany tolerancji rozpatrywanych parametrów fizycznych zaworu (zmiennych projektowych)
- **Cel 5:** Przeprowadzenie analizy wrażliwości wyjść modelu amortyzatora hydraulicznego na zmiany tolerancji rozpatrywanych parametrów geometrycznych oraz fizycznych zaworu (zmiennych projektowych).

Biuro Dziekana

Istota problemu badawczego podjętego przez Doktoranta dotyczy, moim zdaniem, głównie problematyki modelowania pasywnych amortyzatorów hydraulicznych w tzw. procesie rozwoju produktu (amortyzator hydrauliczny). Innymi słowy, Autor zamierzał w ramach swoich badań opracować model parametryczny amortyzatora zaworowego i jego systemu zaworowego, parametryczne modele a) wytrzymałościowe stosów zaworowych, b) hydrauliczne amortyzatora oraz stosowanych w nim zaworów, przeprowadzić analizę wrażliwości celem określenia zmiennych projektowych mających znaczący wpływ na podstawowe osiągi urządzenia. Niezwykle ważne w kontekście potencjalnych zastosowań są cele nakreślone przez Doktoranta w punktach 4 i 5, których realizacja ma pozwolić na ocenę trwałości amortyzatora już na etapie prac projektowych. Istotne dla podjętej tematyki jest poruszenie nie tylko problematyki wpływu określonych czynników fizycznych i geometrycznych na podstawowe osiągi amortyzatora (siły tłumienia), ale także podjęcie opisu wpływu zmiennych projektowych na jego trwałość. Z punktu widzenia producenta tego typu urządzeń jako potencjalnego odbiorcy wyników rozprawy podjęta przez Autora problematyka ma znaczenie niebagatelne. Stosowane w przemyśle motoryzacyjnym czy kolejniczym testy trwałościowe amortyzatorów są jednymi z najbardziej kosztownych w tzw. procesie rozwoju produktu. A zatem posiadanie narzędzia pozwalającego na wstępną chociażby ocenę trwałości amortyzatora pozwoliłoby zmniejszyć koszty rozwoju produktu.

Ogólnie, problem badawczy jest interesujący i obfitujący w szereg wyzwań natury obliczeniowej zwłaszcza w kontekście potencjalnych zastosowań.

2. ANALIZA ZAWARTOŚCI ROZPRAWY I SPOSÓB JEJ MERYTORYCZNEGO PRZEDSTAWIENIA

Wyniki badań Doktoranta zostały udokumentowane na 242 stronach rozprawy zawierającej: streszczenia w j. polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli, 8 rozdziałów, spis literatury zawierający 166 pozycji. W spisie literatury znalazły się 3 prace Autora, w tym 1 praca konferencyjna oraz 2 opublikowane w czasopiśmie z listy B MNiSW.

Rozdział 1 (wprowadzenie) zawiera krótkie omówienie czynników wpływających na redukcję drgań i hałasu w kolejnictwie. Doktorant przedstawia tu analizę układów zawieszenia pojazdów szynowych z uwzględnieniem amortyzatorów hydraulicznych, podaje klasyfikację układów zawieszenia oraz omawia budowę amortyzatorów hydraulicznych oraz problematykę projektowania w/w urządzeń z uwzględnieniem kryteriów mających wpływ na osiągi amortyzatora oraz jego trwałość. Autor kończy rozważania w Rozdziale 1 dyskusją nt. roli oprogramowania CAE (Computer Aided Engineering) we wspomaganiu prac projektowych i konstrukcyjnych. Następnie, w **Rozdziale 2** Autor prezentuje szczegółowy przegląd literatury oraz uzasadnia wybór tematu rozprawy. Doktorant dokonuje tu opisu, m.in. układów zawieszonych pojazdów szynowych, pasywnych amortyzatorów hydraulicznych stosowanych w kolejnictwie. Omawia ich budowę i zasadę działania z uwzględnieniem konstrukcji systemów zaworowych oraz typowych charakterystyk opisujących osiągi amortyzatorów hydraulicznych. Krytycznie analizuje proces projektowania w/w urządzeń i poddaje dyskusji zbiór danych wejściowych oraz powszechnie stosowanych kryteriów w procesie ich projektowania. Począwszy od podrozdziału 2.2.7 Autor podaje przykłady zastosowania programów numerycznych typu CAE do modelowania zachowania amortyzatorów hydraulicznych. Podane przez niego przykłady dotyczą także literatury motoryzacyjnej. Doktorant omawia przykłady modelowania amortyzatorów hydraulicznych przy użyciu, m.in. metody elementów skończonych (MES), obliczeniowej mechaniki płynów (CFD – Computer Fluid Dynamics) oraz metod sprzężonych FSI (Fluid Structure Interactions). Autor opisuje tu także liczne przykłady użycia modeli jednowymiarowych o parametrach skupionych celem zobrazowania zjawisk zachodzących wewnątrz amortyzatora oraz modeli nieparametrycznych (sieci neuronowe) do określenia trwałości zaworów płytkowych. Podrozdział 2.2.8, w którym Doktorant opisuje czynniki wpływające na trwałość zaworów kończy szczegółowy przegląd literatury. Podrozdział 2.3 jest najważniejszym rozdziałem rozprawy – tutaj zawarte są tezy i cele rozprawy sformułowane przez Autora. **Rozdział 3** poświęcony jest opisowi matematycznemu systemowi zaworowego oraz amortyzatora. Zaprezentowana przez Autora koncepcja modelowania systemu zaworowego uwzględnia trzy modele składowe: model mechaniczny systemu zaworowego, model przepływowo oraz model wytrzymałości zmęczeniowej (bazujący na krzywych Wohlera). Model matematyczny amortyzatora hydraulicznego oparty jest na znanym modelu Langa. **Rozdział 4** jest jednym z najważniejszych elementów rozprawy. W rozdziale przedstawiona jest procedura tworzenia i analizy modeli numerycznych systemu zaworowego oraz amortyzatora. Autor omawia tu podstawowe zagadnienie teoretyczne dotyczące metody elementów skończonych z uwzględnieniem przestrzennych i powłokowych elementów skończonych. Tworzy modele CAD na podstawie dokumentacji technicznej amortyzatora kolejowego VG50 firmy Growag, określa warunki brzegowe dla symulacji MES. Prezentuje proces budowy oraz analizy modelu MES systemu

zaworowego dla zaworu tłoka oraz zaworu dolnego (denka). Próbuje określić optymalny rodzaj oraz wielkość elementu skończonego w środowisku ANSYS. Przeprowadza weryfikację doświadczalną sformułowanych modeli MES. Opracowuje parametryczny model hydrauliczny amortyzatora z uwzględnieniem obliczonych wcześniej charakterystyk MES i przepływowych stosów zaworowych. Zaprezentowany przez Doktoranta model poddany jest procedurze strojenia oraz weryfikacji doświadczalnej. W rozdziale 4.4 Autor opisuje procedurę tworzenia modelu wytrzymałości zmęczeniowej systemu zaworowego – zaproponowany jest model, którego wyjściem jest krytyczna liczba cykli odkształceń dysków roboczych do wystąpienia uszkodzenia zmęczeniowego. Szczególnie istotna w kontekście postawionych tez jest zamieszczona w podrozdziale 4.4.1 procedura wyznaczania eksperymentalnych krzywych Wohlera. Autor kończy rozważania w Rozdziale 4 opisem planu badań wpływu tolerancji parametrów geometrycznych oraz fizycznych na wytrzymałość zmęczeniową oraz poziom sił tłumienia. Materiał zawarty w Rozdziałach 3 i 4 stanowi punkt wyjścia do dalszych rozważań Autora w **Rozdziałach 5, 6 i 7**. W szczególności, w obszernym **Rozdziale 5** Doktorant prezentuje wyniki analizy wrażliwości wpływu tolerancji rozpatrywanych zmiennych projektowych (średnica zewnętrzna dysków, wysokości dysków, średnica podkładki niesprężystej, promień podkładki sprężystej, moduł Younga materiału dysków, siła obciążenia wstępnego dysków, współczynnik tarcia pomiędzy dyskami, współczynnik tarcia między podkładką niesprężystą a dyskami, współczynnik tarcia między elementami zaworu a dyskami) na charakterystyki systemów zaworowych oraz osiągi (siły tłumienia) amortyzatora. Dodatkowo, Autor wyjaśnia powody przyjęcia określonego zakresu tolerancji. W opinii Autora, rozdział ma na celu ilustrację wpływu tolerancji rozpatrywanych parametrów na charakterystyki mechaniczne i hydrauliczne systemów zaworowych i amortyzatora, które w efekcie prowadzą do zmian wytrzymałości zmęczeniowej systemów zaworowych oraz generowanych sił tłumienia przez amortyzator. **Rozdział 6** stanowi uzupełnienie wyników zaprezentowanych w poprzednim rozdziale o klasyfikację zmiennych projektowych przeprowadzoną przez Doktoranta w oparciu o regułę Pareto-Lorenza. Na podstawie zamieszczonych w Rozdziale 6 wykresów wrażliwości Autor typuje zmienne projektowe o największym wpływie na parametry wytrzymałościowe systemów zaworowych (krytyczna liczba cykli) oraz osiągi amortyzatora (siła tłumienia) – średnica podkładki dyskowej niesprężystej, wysokość dysków sprężystych oraz promień zaokrąglenia podkładki dyskowej niesprężystej (parametry TOP 3). **Rozdział 7** natomiast poświęca Doktorant analizie wrażliwości systemów zaworowych amortyzatora dla łącznego oddziaływania parametrów wytypowanych w Rozdziale 6 jako parametry TOP 3. W rozdziale porównano indywidualny wpływ parametrów TOP 3 z wpływem łącznym dla wytrzymałości zmęczeniowej oraz sił tłumienia. **Rozdział 8** zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań, wnioski oraz przemyślenia dotyczące dalszych kierunków działań. Podsumowanie w czytelny sposób oddaje zakres rozprawy. Autor do swoich głównych osiągnięć zalicza, m.in. opracowanie koncepcji procesu projektowania konstrukcji amortyzatora hydraulicznego w oparciu o modele matematyczne, tj. nieliniowy model MES systemu zaworowego, przepływowy model systemu zaworowego, model wytrzymałości zmęczeniowej stosu zaworowego, model hydrauliczny amortyzatora, wytypowanie zbioru parametrów, których tolerancje mają największy wpływ na spełnienie kryteriów projektowych, przeprowadzenie wielowariantowej analizy wrażliwości parametrycznej modeli systemu zaworowego oraz amortyzatora. Zdaniem Doktoranta, przedstawione w rozprawie wyniki potwierdzają możliwość analizy systemów zaworowych w środowisku numerycznym, a sam model numeryczny umożliwia walidację systemu zaworowego pod kątem spełnienia określonych kryteriów projektowych.

3. OCENA MERYTORYCZNA

W świetle przedstawionych wyników badań laboratoryjnych i obliczeń numerycznych ujętych zwłaszcza w Rozdziałach od 3 do 7 główne tezy pracy można uznać za potwierdzone. Kolejne rozdziały pracy określają w sposób zrozumiały i logiczny badania podjęte przez Autora celem rozwiązania postawionego przed nim problemu badawczego.

Doktorant opracował, moim zdaniem, poprawny, choć niezbyt obszerny przegląd literatury (w części poświęconej modelowaniu amortyzatorów hydraulicznych), dokonał prawidłowej analizy wybranych przez siebie konstrukcji dwururowych amortyzatorów hydraulicznych oraz konwencjonalnych systemów zaworowych ze stosami złożonymi z dysków roboczych, wytypował wstępnie grupę zmiennych projektowych mających znaczący wpływ na osiągi amortyzatora i wytrzymałość zmęczeniową stosów zaworowych, zbudował model parametryczny CAD systemów zaworowych i opracował modele systemów zaworowych w oparciu o metodę elementów skończonych. Następnie przeprowadził analizę wrażliwości modeli MES celem optymalnego doboru wielkości elementu skończonego, przeprowadził obliczenia charakterystyk statycznych stosów zaworowych oraz

mg

opracował poprawny model przepływowy systemów zaworowych, a także quasi-statyczny model hydrauliczny amortyzatora. Zrealizował analizę wrażliwości wpływu zmiennych projektowych na osiągi amortyzatora i wytrzymałość zmęczeniową systemów zaworowych. Zaprojektował i zbudował stanowiska laboratoryjne, z użyciem których wyznaczył krzywe Wohlera stosów dysków roboczych i dokonał weryfikacji opracowanych wcześniej modeli hydraulicznych. Stosując regułę Pareto-Lorenza, na podstawie zebranych wyników analizy wrażliwości wyznaczył grupę zmiennych projektowych o największym wpływie na siły tłumienia amortyzatora i wytrzymałość zmęczeniową jego zaworów.

Podsumowując, treść rozprawy ma istotny walor poznawczy i może dostarczyć wielu wskazań oraz informacji w zakresie projektowania amortyzatorów hydraulicznych nie tylko dla potrzeb kolejnictwa, ale także np. motoryzacji. Szczególnie interesująca z punktu widzenia praktycznych aspektów pracy jest próba identyfikacji przez Doktoranta czynników mających największy wpływ na osiągi amortyzatora i jego wytrzymałość zmęczeniową. Badania trwałościowe należą bowiem do grupy najbardziej kosztownych testów amortyzatorów hydraulicznych w procesie rozwoju produktu. A zatem uwzględnienie w/w czynników już na etapie wczesnych prac konstrukcyjnych w procesie projektowania może przynieść wymierne korzyści finansowe dla potencjalnego odbiorcy przemysłowego.

Tezy rozprawy mogą uznać za potwierdzone przez Doktoranta z oczekiwaną od niego sprawnością w zakresie przeprowadzania złożonego eksperymentu badawczego, poprawnego wykorzystania oprogramowania do obliczeń numerycznych, analizy i interpretacji wyników eksperymentu laboratoryjnego jak i wyników symulacji numerycznych.

4. UWAGI

Podczas lektury pracy nasunęło mi się szereg spostrzeżeń, które podzieliłem na dwie zasadnicze grupy: uwagi natury redakcyjnej oraz uwagi merytoryczne.

4.1. Uwagi redakcyjne

Rozprawa została zredagowana przez Doktoranta starannie z dużą dbałością o szatę graficzną pracy. Wykresy i ilustracje są wykonane czytelnie i estetycznie. Gdyby nie usterki stylistyczne, pracę można by uznać za wzorcową. Pewnym niedociągnięciem jest stosowanie przez Autora różnych czcionek do składu tekstu, wyrażeń matematycznych i ilustracji oraz stosowanie „gwarowych” wyrażeń z codziennej praktyki inżynierskiej, np. „zdejbowanie charakterystyki”. Brakuje spisu rysunków i tabel.

4.2. Uwagi merytoryczne

Podczas lektury rozprawy nasunęły mi się wymienione niżej uwagi o charakterze merytorycznym:

- Przegląd literatury poświęconej modelowaniu pasywnych amortyzatorów hydraulicznych jest niezbyt obszerny.
- Autor zaniedbuje wpływ lepkości cieczy w modelu przepływowym systemu zaworowego. Jaki był powód tego stanu rzeczy? Lepkość cieczy z reguły ma znaczący wpływ na osiągi amortyzatora w zakresie niskich i średnich prędkości (poniżej 0.3 /s).
- Autor w pracy analizuje głównie modele trójwymiarowe zaworów. Brakuje analizy modeli osiowosymetrycznych systemów zaworowych (w cylindrycznym układzie współrzędnych), co ma niebagatelne znaczenie w kontekście chociażby skrócenia czasu obliczeń – zaproponowany przez Autora zestaw zmiennych projektowych nie wyklucza zastosowania modeli osiowosymetrycznych. Tym bardziej niezrozumiałe jest nieuwzględnienie tego typu modeli w rozprawie.
- Autor prezentuje wyniki obliczeń dla jednej wybranej prędkości tłoka amortyzatora (0.1 m/s). Z uwagi na obecne nieliniowości, o których zresztą Doktorant wspomina w pracy, należałoby obliczenia wykonać dla kilku wybranych prędkości tłoka.
- Oprócz zestawu wyodrębnionych przez Autora parametrów znaczący wpływ na osiągi amortyzatora hydraulicznego z systemem zaworów dyskowych mają wpływ także m.in. kształt powierzchni kontaktu podkładki niesprężystej ze stosem dysków, błędy położenia podkładki względem stosu dysków. Czy



w/w czynniki były analizowane przez Autora, np. na etapie badań wstępnych?

- W analizie MES stosów zaworowych Autor stosuje równomierne obciążenie powierzchni dysków roboczych ciśnieniem. Takie założenie jest słuszne tylko dla stanu przed otwarciem zaworu i może prowadzić do przeszacowania naprężeń i odkształceń stosów zaworowych.
- W praktyce inżynierskiej osiągi amortyzatorów hydraulicznych są często opisywane w użyciu wykresów siła-przemieszczenie, siła-prędkość oraz charakterystyki statycznej siła-prędkość. Wynika to z faktu, iż w ogólnym przypadku siła tłumienia generowana przez amortyzator hydrauliczny jest złożoną funkcją nie tylko prędkości, ale także przemieszczenia. Tymczasem Autor w rozprawie stosuje tylko jeden z tych wykresów (siła-przemieszczenie), praktycznie pomijając pozostałe.
- Autor dyskretyzuje geometrię stosu zaworowego z użyciem jednorodnej siatki elementów skończonych. Często lepsze wyniki (także w aspekcie skrócenia czasu obliczeń) uzyskuje się poprzez gradację wielkości elementów skończonych wokół obszarów spiętrzenia naprężeń. Czy ta technika była analizowana przez Doktoranta?
- Z obserwacji map naprężeń dla analiz MES podkładki dyskowej, np. Rys. 95, wynika dużo niższy poziom naprężeń zredukowanych w podkładce niż w dyskach roboczych. Czy zatem optymalnym rozwiązaniem nie byłoby potraktowanie podkładki jako ciała sztywnego w analizie MES, co skutkowałoby m.in. znacznym zmniejszeniem rozmiarów modelu oraz skróceniem czasu obliczeń?
- W jakiej temperaturze były przeprowadzane badania weryfikacyjne amortyzatora hydraulicznego? Czy temperatura cieczy amortyzatora (cylindra zewnętrznego lub tłoczyska) była w jakikolwiek sposób monitorowana?

5. KONKLUZJA

Biorąc pod uwagę omówione powyżej rezultaty rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Woźniaka stwierdzam, iż przedstawił on istotne, oryginalne i interesujące wyniki badawcze pasywnych dotyczące tematyki projektowania pasywnych amortyzatorów hydraulicznych. Moim zdaniem, Doktorant udowodnił postawione we wstępie rozprawy tezy i osiągnął postawiony przed sobą cel. Podkreślenia wymaga fakt, iż praca zawiera zarówno wyniki autorskich obliczeń numerycznych jak i laboratoryjnych badań doświadczalnych.

Własny dorobek naukowy, na który powołuje się Doktorant w rozprawie, a więc bezpośrednio związany z tematyką badań, liczy 3 pozycji. Na liście publikacji znajdują się 1 referat konferencyjny i 2 oryginalne artykuły, w tym 1 samodzielny, opublikowane w czasopiśmie z listy B MNiSW.

Recenzowana przeze mnie praca, moim zdaniem, nie zawiera istotnych uchybień merytorycznych. Wymienione przeze mnie powyżej usterki w Rozdziale 4 w/w recenzji nie podważają faktu osiągnięcia założonych przez Doktoranta na wstępie tez. Od strony redakcyjnej rozprawa została złożona przez Autora niemal wzorcowo.

Na pochwałę zasługuje bardzo duży wkład pracy włożony przez Doktoranta w przygotowanie wstępnych założeń rozprawy i przeprowadzenie złożonych analiz numerycznych z użyciem opracowanych przez siebie modeli matematycznych, które zweryfikował doświadczalnie. Złożoność problemu, z jakim przyszło zmierzyć się Autorowi, wymagała niewątpliwie wiedzy teoretycznej i doświadczenia inżynierskiego.

Uważam iż, wyniki pracy mgr inż. Mateusza Woźniaka mają charakter aplikacyjny z ukierunkowaniem na projektowanie pasywnych amortyzatorów hydraulicznych z zaworami wielopłytkowymi stosowanymi w szeroko pojętym obszarze redukcji drgań. Choć tematyka pracy dotyczy bezpośrednio zawieszek pojazdów szynowych, to zaprezentowane przez Autora wyniki badań mogą stanowić wartościowy wkład do prac projektowo-badawczych w innych obszarach, np. w motoryzacji. **Przedstawione w rozprawie wyniki spełniają wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami).** Upoważnia mnie to do przedłożenia Radzie Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach wniosku o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Jednocześnie chciałbym w tym miejscu zachęcić doktoranta do dalszych prac badawczych w tej dziedzinie. Problematyka oceny trwałości systemów zaworowych stosowanych w amortyzatorach hydraulicznych ma nie tylko cenny wymiar poznawczy, ale także wymierny finansowy (w kontekście potencjalnego przemysłowego odbiorcy wyników rozprawy Autora). Przedstawione przez Doktoranta w pracy badania mogą stanowić wartościowy wstęp do dalszych prac badawczych w tym zakresie i rozszerzenia podjętej problematyki.