

Prof. dr hab. inż. Witold ELSNER  
*Instytut Maszyn Ciepłych*  
*Politechnika Częstochowska*  
*ul. Armii Krajowej 21; 42-200 Częstochowa*  
tel.: (034) 3250507; e-mail: welsner@imc.pcz.czyst.pl

Częstochowa, 22.11.2021

### *Recenzja*

rozprawy doktorskiej mgr inż. Daniela Buczkowskiego:

### **„Sprzężony przeplywowo-mechaniczny model numeryczny zaworu amortyzatora”**

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej Prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak w piśmie RD(IMe)-124/006/2020/2021 z dnia 22.09.2021 r. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Grzegorz Nowak, prof. PŚ. Przedstawiona do recenzji praca zawiera 169 strony i jest podzielona na dziewięć rozdziałów. Pracę kończy spis pozycji literaturowych związanych z tematyką rozprawy oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

#### **1. Ocena ogólna.**

Tematyka rozprawy dotyczy analizy numerycznej pracy wybranych typów zaworów wykorzystywanych we współczesnych amortyzatorach. Zawieszenie samochodowe składa się z wielu elementów, które przenoszą obciążenia z kół na podwozie samochodu. Jednym z ważniejszych elementów jest amortyzator, którego własności tłumiące mają duże znaczenie nie tylko dla komfortu jazdy pasażerów, ale również wpływają na bezpieczeństwo czynne pojazdu samochodowego a więc właściwą pracę układu kierowniczego i hamulcowego. W tym zakresie często trzeba osiągnąć odpowiedni kompromis pomiędzy komfortem pasażerów a zachowaniem pojazdu.

Obiektem zainteresowania Doktoranta są trzy typy zaworów wykorzystywanych w amortyzatorach, w tym zawór zaciskowy typu „disc-stack” i zawór zwrotny, oba stosowane w większości produkowanych amortyzatorów pasywnych oraz specjalny zawór pomocniczy zwany zaworem kontrolowanego przecieku, który jest obecnie opracowywany jako część zaawansowanego zaworu pasywnego klasy premium.

Głównym celem pracy było stworzenie kompleksowej procedury obliczeniowej pozwalającej na modelowanie pracy zaworu amortyzatora z wykorzystaniem współczesnej wiedzy oraz zaawansowanych metod numerycznych. W tym celu Doktorant postanowił wykorzystać metodę modelowania sprzężonego ciała stałe - ciecz znane pod angielską nazwą Fluid Structure Interaction (FSI) i stosowaną w analizie zagadnień aerosprężystych. Punktem odniesienia dla tej

metody był stosowany do tej pory w macierzystej firmie Tenneco półempiryczny model amortyzatora. Z punktu widzenia oczekiwań przemysłu, jednym z kryteriów, oprócz dobrego odwzorowania pracy zaworów, był również czas obliczeń (czyli czas jeden cyklu obliczeniowego), który nie powinien przekraczać 12 godzin dla uzyskania pełnej charakterystyki zaworu.

Doktorant nie ograniczył się tylko do stworzenia modelu, ale szczegółowo go zwalidował opierając się na dostępnych danych z badań na stanowiskach doświadczalnych, wykazując dobrą zgodność wyników oraz wskazując na potencjał własnego algorytmu pozwalający modelowaniu innych zaworów o nieznanymi wcześniej charakterystykach.

W mojej ocenie podjęta tematyka badań, należy do nurtu prac badawczych z obszaru inżynierii mechanicznej. Została ona prawidłowo nakreślona i może stanowić przedmiot pracy doktorskiej. Jest ona istotna z poznawczego punktu widzenia w badaniach z zakresu oddziaływań aerosprężystych płyn - ciało stałe i co więcej jest ona zgodna z oczekiwaniami płynącymi z przemysłu samochodowego. Należy również stwierdzić, że tytuł rozprawy jest dobrze dobrany i właściwie oddaje jej treść.

## 2. Ocena szczegółowa.

Praca, po krótkim wstępie (**rozdział 1**), rozpoczyna się od sformułowania głównego celu pracy, przedstawienia celów szczegółowych oraz krótkiej argumentacji dotyczącej przyczyn podjęcia tematu. W tym rozdziale, poza odniesieniem się do samej procedury i metodyki modelowania, dobrze byłoby również zwrócić uwagę na poznawcze cele pracy, takie jak opis zjawisk przepływowych oraz analizę pracy elementów sprężystych w zaworach, które to zagadnienia szczegółowo są opisane w rozdziale 8 i które też stanowią dużą wartość niniejszej rozprawy.

**Rozdział 2** poświęcony jest omówieniu budowy i zasady działania amortyzatora oraz kluczowych jego elementów jakimi są systemy zaworowe. Oprócz wymagań dotyczących konstrukcji i wytrzymałości przy określonych obciążeniach zewnętrznych działających na amortyzator, ważnym elementem procesu projektowania amortyzatorów jest dokładne zaprojektowanie odpowiedniej charakterystyki siły tłumienia, za co w dużym stopniu odpowiadają właśnie systemy zaworowe.

**Rozdział 3** zawiera przegląd literaturowy metod modelowania amortyzatorów, począwszy od prostych empirycznych i półempirycznych modeli a kończąc na modelach w pełni numerycznych. Najbardziej zaawansowane metody wykorzystują modelowanie sprzężone ciało stałe - ciecz znane pod angielską nazwą Fluid Structure Interaction (FSI). Doktorant zwrócił uwagę, że publikacji dotyczących wykorzystania tego ostatniego podejścia nie jest wiele a w znanych mu i cytowanych w tym rozdziale pracach, stosowana metodyka była w wielu aspektach uproszczona i nie uwzględniała min. modelowania turbulencji. Jak rozumiem, ta obserwacja była jednym z punktów wyjścia recenzowanej pracy, w której zaproponowano model bardziej złożony.

**Rozdział 4** wprowadza czytelnika w podstawy modelowania FSI. Autor zwraca uwagę, że współczesne pakiety oprogramowania komercyjnego typu ANSYS, COMSOL, ADINA zapewniają sprzężenie pomiędzy modelami płynu i ciała stałego, które może być typu jawnego lub niejawnego z jednokierunkową, lub dwukierunkową wymianą danych. W opisie części solwera przepływowego znajduje się dość obszerny przegląd podstawowych modeli turbulencji. Doktorant zdecydował się realizować pracę wykorzystując pakiet ANSYS.

Z kolei **rozdział 5** zawiera opis eksperymentalnych stanowisk do testów amortyzatorów, z których opisano trzy najważniejsze tj. stanowiska serwo-hydrauliczne, przepływowe oraz stanowisko łączone do badania dynamometrycznego tłumienia. Celem tego ostatniego jest odizolowanie pracy zaworu od wpływu czynników zewnętrznych, przy jednoczesnym zachowaniu możliwości dynamicznego wzbudzenia przepływu oleju w układzie.

Ostatni rozdział z grupy rozdziałów wprowadzających, tj. **rozdział 6**, opisuje założenia półempirycznego modelu amortyzatora stosowanego w firmie Tenneco. Model ten składa się części hydraulicznej oraz z uproszczonego, liniowego modelu pracy stosu tarcz zaworu. Pomimo dość szerokiego opisu tego modelu nie znalazłem tu jednak podsumowania, które by wskazywało na zasadnicze wady, czy też ograniczenia wyżej opisanego podejścia. Czy mógłbym prosić o uzupełnienie? Jest to ważne z punktu widzenia podjętego celu pracy. Tym bardziej, że jak wykazano to w dalszych rozdziałach pracy, za pomocą modelu półempirycznego można z zadawalającą dokładnością odtworzyć charakterystykę zaworu, nawet jeśli jego zachowanie jest *a priori* nieznanne.

Jednym z ważniejszych rozdziałów pracy jest **rozdział 7**, w którym Doktorant formułuje i opisuje proponowany model numeryczny a właściwie całą metodę postępowania, na którą składają się takie etapy jak, przygotowanie geometrii modelu, definicja domeny dla obszaru płyn i obszaru ciała stałe, budowa i analiza struktury siatki obliczeniowej, dobór modelu turbulencji.

Autor w pracy przyjął założenie, że obliczenia przepływu oleju są prowadzone przy nieruchomym zaworze. Uproszczenie to jest uzasadnione faktem, że takie warunki panują w trakcie stanowiskowych badań eksperymentalnych. Dobrze jednak aby Autor spróbował oszacować jak takie uproszczenie wpłynie na jakość odwzorowania struktura ciało-stałe podczas pełnego ruchu zaworu. Tym bardziej, że w rozdziale 3, do którego Autor się odwołuje brak jest wystarczających szczegółów na ten temat.

Przygotowując kształt domeny obliczeniowej płynu Autor przyjął dodatkowe założenie, że uproszczony kształt domeny pomiędzy stosem tarcz a podkładką wsporczą nie wpłynie istotnie na wynik obliczeń. W tym miejscu również chciałbym prosić o szersze uzasadnienie.

Ponieważ jest modelowany tylko jeden suw pracy podane uzasadnienie o przyjęciu izotermicznych warunków przepływu dla obliczeń jest przekonujące. Niemniej jednak, że w warunkach rzeczywistych amortyzator pracuje w sposób ciągły, tłumiąc drgania zamienia energię kinetyczną w ciepło. Dlatego prosiłbym o oszacowanie jaki błąd popelnia się nie uwzględniając

tego zjawiska. Jaki może być wpływ podwyższonej temperatury na lepkość oleju? Jaki wpływ miałyby przyjęcie nieizotermicznego warunku brzegowego.

Ważnym elementem zaproponowanej metodyki był dynamiczny dobór siatki obliczeniowej, gdzie założono „one-way coupling model”, stosując w każdym kroku obliczeniową ponowną generację siatki (remeshing). Moim zdaniem szczegółowa analiza tego aspektu stanowi istotną wartość niniejszej pracy doktorskiej.

Zaproponowaną metodykę postępowania zastosowano dla dwóch konstrukcji zaworów tj.: zaciskowego zaworu typu „disc-stack” oraz zaworu zwrotnego, występujących w klasycznym amortyzatorze pasywnym. Oprócz nich omówiono model specjalnego zaworu pomocniczego zwanego zaworem kontrolowanego przecieku, który jest ważnym elementem składowym zaawansowanego zaworu pasywnego klasy premium. Jego zadaniem jest dodatkowa kontrola krzywej siły tłumienia. Ze względu na konstrukcję wyzwaniem był tu algorytm dynamicznej adaptacji siatki ośrodka płynnego.

Należy podkreślić, że Autor zwrócił uwagę na wszystkie ważniejsze elementy procedury i kryteria modelowania numerycznego takie jak, dobór i zagęszczenie siatki obliczeniowej, dobór warunków brzegowych oraz dobór modelu turbulencji. Trzeba więc przyznać, że Autor pewnie się porusza w tym zakresie, opisując poszczególne kroki ze znajomością przedmiotu.

Największą wartość merytoryczną mają badania opisane w **rozdziale 8**, który zawiera omówienie wyników obliczeń dla trzech wspomnianych powyżej modeli zaworów. Ciekawe jest porównanie przedstawione na rys. 8.3-8.5 dla zaworu zaciskowego, na którym widoczne jest porównanie charakterystyk spadku ciśnienia uzyskane drogą modelowania numerycznego, przy pomocy modelu pół-empirycznego oraz na stanowisku doświadczalnym. Jak widać obie metody obliczeń dają zbliżone wyniki. Pojawia się więc pytanie, czy model półempiryczny nie jest wystarczający? Moim zdaniem największą zaletą proponowanej metodyki FSI jest możliwość szczegółowej analizy zjawisk przepływowych w tym wymagającym obszarze amortyzatora a znajomość pola prędkości i pola ciśnienia może być podstawą do optymalizacji kształtu tłoka w celu uzyskania pożądanych charakterystyk zaworu.

Wartość zaproponowanej w pracy metody FSI potwierdza zamieszczona analiza zjawiska histerezy podczas pracy zaworu. Wyniki obliczeń numerycznych wskazują, że kluczowym parametrem mającym wpływ na występowanie i wielkość pętli histerezy jest tarcie pomiędzy elementami zaworu.

Praca została podsumowana w **rozdziale 9**, który zawiera kilka kluczowych wniosków szczegółowych omawianych w poszczególnych rozdziałach, które nie budzą zastrzeżeń. Autor wykazał, że zaproponowana przez Niego metodyka, bazująca na FSI pozwala na uzyskanie wiarygodnych wyników o zadowalającej zgodności z danymi eksperymentalnymi. A ponieważ nie jest tu wymagane wprowadzanie korelacji eksperymentalnych metodyka ta może zostać zaadaptowana do projektowania, testów i optymalizacji nowych zaworów.

### 3. Podsumowanie i wnioski końcowe

Pomimo przedstawionych powyżej uwag o charakterze dyskusyjnym stwierdzam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi wartościowe opracowanie naukowe, a wyniki badań w znacznym stopniu wzbogacają stan wiedzy dotyczący funkcjonowania amortyzatorów. Praca dotyczy aktualnej tematyki badawczej i jest istotna z praktycznego punktu widzenia. Zawartość pracy oraz jej poziom merytoryczny świadczy, że Doktorant dysponuje wiedzą oraz odpowiednim doświadczeniem w rozwiązywaniu problemów naukowych.

Reasumując uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa jest obszernym opracowaniem naukowym, stanowi samodzielne i oryginalne rozwiązanie złożonego zadania naukowego, a uzyskane przez Doktoranta wyniki badań mają odpowiednią wartość poznawczą.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Daniela Buczkowskiego spełnia wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę zakres, jak również poziom rozprawy doktorskiej wnoszę o jej wyróżnienie, pod warunkiem spełnienia wymogów formalnych obowiązujących na Politechnice Śląskiej.

