



Dr hab. inż. Monika Pernach, prof. AGH

Kraków, 2.12.2023

### Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Sebastjana pt.: "Optimization of automotive suspension components with consideration of their unstable behavior" opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia 27.09.2023 r.

#### 1. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska napisana w języku angielskim składająca się z wprowadzenia, 5 rozdziałów zasadniczych, podsumowania z wnioskami i planami rozwoju modelu oraz ze spisu literatury. Spis literatury obejmuje 134 pozycje, z uwzględnieniem publikacji z ostatnich pięciu lat oraz takich, które powszechnie są uznawane za wiodące w analizowanej tematyce. Trzy publikacje ujęte w bibliografii są współautorstwa Doktoranta. Praca zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim. Struktura pracy jest zgodna z przyjętymi standardami.

W rozdziale I przedstawiono oczekiwania stawiane obecnie producentom amortyzatorów samochodowych, wskazując na powszechne dążenie do obniżenia masy amortyzatorów przy zachowaniu ich wysokiej skuteczności w zakresie tłumienia drgań oraz zapewnienia stateczności zawieszenia. To właśnie potrzeba stworzenia rozwiązań wspierających technologię wytwarzania amortyzatorów o takich charakterystykach stała się motywacją do podjęcia tematu realizowanego przez Doktoranta. W rozdziale I sformułowano także cel i tezę pracy, oraz przedstawiono plan badań, obejmujący następujące etapy: opracowanie modelu numerycznego do predykcji wartości granicznej siły ściskającej, opracowanie metody modyfikacji kształtu amortyzatora z uwzględnieniem ograniczeń produkcyjnych, stworzenie algorytmu optymalizacji, której celem jest redukcja masy amortyzatora, weryfikacja doświadczalna.

Rozdział II zawiera podstawowe informacje na temat przedmiotu badań. Autor opisał konstrukcję oraz zasadę działania amortyzatora, koncentrując się na czynnikach, które w istotny sposób wpływają na skuteczność jego pracy, w tym na zachowanie stateczności kolumny zawieszenia. W dalszej części przedstawiono ideę i algorytm rozwiązania MES

w zastosowaniu do symulacji pracy amortyzatora poddawanego działaniu krytycznych obciążeń ściskających.

W rozdziale III scharakteryzowano wybrane metody optymalizacji, w tym metody gradientowe oraz metody ewolucyjne, które wykorzystano w pracy do rozwiązania przedmiotowego zadania optymalizacji. Przedstawiono ograniczenia każdej z metod, koszt obliczeń oraz opisano algorytm poszukiwania ekstremum. Szczegółowo opisano optymalizację topologii z wykorzystaniem Level-Set Method (LSM). W drugiej części rozdziału zaprezentowano ideę tworzenia metamodelu na przykładzie trzech stosowanych powszechnie metod: metody powierzchni odpowiedzi (RSM), Kriging oraz sztucznych sieci neuronowych (ANN).

Od rozdziału IV rozpoczyna się opis badań własnych. Sformułowano tu problem optymalizacji: redukcja masy amortyzatora z uwzględnieniem ograniczeń związanych ze statecznością całego układu zawieszenia. Autor przedstawił schemat obciążenia amortyzatora oraz zdefiniował przestrzeń projektową w postaci dolnego wspornika amortyzatora, wskazując na ograniczenia w możliwościach modyfikacji geometrii ze względu na bliskie położenie elementów, takich jak: wał napędowy, drążek stabilizatora, felga, opona czy zaciski klocków hamulcowych. Następnie opisano algorytm rozwiązania hybrydowego, złożonego z algorytmów: genetycznego (MIGA) i strategii ewolucji (EVOL). W dalszej części rozdziału przedstawiono dwie metody modyfikacji kształtu amortyzatora: metodę przestrzenną LSM oraz metodę rzutowania.

Proces doboru parametrów algorytmu hybrydowego w celu poprawy jego wydajności oraz sposób przygotowania zestawów danych uczących i walidacyjnych dla metamodelu znalazły się w rozdziale V. Przeanalizowano wpływ wielkości próby na dokładność predykcji metamodelu porównując rozwiązanie bazujące na sztucznych sieciach neuronowych i na metodzie Kriging.

W rozdziale VI przedstawiono weryfikację opracowanej metody optymalizacji na przykładzie geometrii pasywnego oraz półaktywnego amortyzatora samochodowego. Dokonano również oceny wykorzystania metamodelu do przyspieszenia czasu obliczeń.

Rozdział VII - to podsumowanie z wnioskami, opisem własnych wdrożeń przemysłowych i prezentacji wyników na konferencjach branżowych oraz wytyczeniem przedmiotowych zadań perspektywicznych.

## 2. Ogólna ocena pracy

Głównym wyzwaniem branży motoryzacyjnej jest redukcja masy pojazdów. Takie podejście pokrywa się z promowaną obecnie zasadą zrównoważonego rozwoju w zakresie ochrony środowiska. Z jednej strony pozwala ono na zminimalizowanie zużycia energii i obniżenie emisji gazów cieplarnianych przez samochody spalinowe, z drugiej strony zwiększa zasięg samochodów elektrycznych. Rozwój branży motoryzacyjnej to również adaptacja technologii do transformacji cyfrowej. W dobie wysokiej konkurencji, kiedy trzeba szybko reagować na potrzeby zmieniającego się rynku, zwiększać jakość produktu, obniżając koszty jego wytwarzania, inteligentna produkcja jest koniecznością. Odpowiedzią na oczekiwania przemysłu są m.in. systemy cyberfizyczne i cyfrowe bliźniaki, oparte na modelach numerycznych rzeczywistych procesów, które usprawniają proces projektowania i wytwarzania. Biorąc pod uwagę powyższe czynniki wybór tematyki pracy można uznać za w pełni uzasadniony.

Autor stanął przed wyzwaniem stworzenia rozwiązania, charakteryzującego się niskim kosztem obliczeniowym, które umożliwi projektowanie amortyzatorów łączących wysoką jakość i bezpieczeństwo, z minimalną masą. Wobec braku gotowego rozwiązania do optymalizacji konstrukcji amortyzatorów, pracujących w niestabilnych warunkach i przy ekstremalnych obciążeniach, z uwzględnieniem możliwości produkcyjnych, sformułowano następującą tezę: „Możliwe jest sformułowanie metody oraz algorytmu optymalizacji pozwalających na minimalizację masy amortyzatora samochodowego biorąc pod uwagę konieczność zapewnienia stateczności układu zawieszenia pod działaniem ekstremalnych poziomów sił ściskających oraz uwzględniając konieczność zapewnienia wykonalności optymalizowanych komponentów.”

Rozwiązanie postawionego w tezie problemu wymaga realizacji bardzo wielu zadań, takich jak: opracowanie modelu numerycznego MES i identyfikacja jego parametrów na podstawie badań doświadczalnych, implementacja algorytmów optymalizacyjnych w podejściu hybrydowym, a w kolejnym etapie wykonanie obliczeń w oparciu o metamodel. Zakres prac i poziom ich trudności, konieczność wykorzystania różnych metod numerycznych, pokazuje z jak bardzo zaawansowanym problemem mamy do czynienia. Doktorant konsekwentnie zrealizował wszystkie zaplanowane zadania, wykazując dobre przygotowanie do prowadzenia oryginalnych badań naukowych w zakresie modelowania numerycznego i optymalizacji.

W pracy można wyróżnić następujące szczegółowe osiągnięcia:

- 1) Opracowanie nieliniowego modelu MES, umożliwiającego predykcję wartości granicznej siły powodującej utratę stateczności amortyzatora samochodowego pod działaniem ekstremalnych sił ściskających.
- 2) Opracowanie algorytmu modyfikacji topologii kutego uchwyty amortyzatora w oparciu o zmodyfikowaną metodę poziomicy (LSM) oraz metodę rzutowania. Szczególnie istotne jest uwzględnienie w rozwiązaniu ograniczeń produkcyjnych, dzięki temu możliwe jest zastosowanie modelu do projektowania rzeczywistego procesu wytwarzania.
- 3) Opracowanie hybrydowego algorytmu optymalizacji opartego na algorytmach: genetycznym i strategii ewolucyjnej, który umożliwił redukcję masy amortyzatora, przy zachowaniu stateczności układu zawieszenia.

Uwagi ogólne:

1. Pewne zastrzeżenia budzi tytuł rozprawy, jest mało precyzyjny. Zastosowana liczba mnoga sugeruje, że przedmiotem optymalizacji jest wiele komponentów amortyzatora, a praca dotyczy jednego elementu – kutego uchwyty, w dwóch typach amortyzatorów: jednorurowym- pasywnym i półaktywnym.
2. Dyskusyjnym wydaje się zapis w tezie pracy. Zamierzano chyba sformułować algorytm optymalizacji, a metodę optymalizacji – dobrać. Wieloznaczne jest tu również stwierdzenie: „...uwzględniając konieczność zapewnienie wykonalności optymalizowanych komponentów”. Czy wykonalność odnosi się do technologii wytwarzania (kucie), czy do geometrii amortyzatora?
3. Nasuwają się też pytania - Dlaczego algorytm hybrydowy powstał z połączenia algorytmów MIGA oraz EVOL? Wykorzystanie jako pierwszego algorytmu MIGA wydaje się oczywiste, ponieważ umożliwi on znalezienie przybliżonego położenia wartości optymalnych. - Czy druga w kolejności nie powinna być jedna z metod deterministycznych np. Hooke'a-Jeevesa albo sympleks Nelder-Meada? Takie podejście pozwoliłoby dokładniej i szybciej znaleźć ekstremum, biorąc pod uwagę wcześniejsze obliczenia algorytmem MIGA. - Czy o wyborze algorytmu EVOL zdecydowały prowadzone uprzednio testy? - Dlaczego zdecydowano się na podział w stosunku 80% MIGA i 20% EVOL? - Dlaczego wybrano strategię ewolucyjną  $1+\lambda$ ?

4. Wyjaśnienia wymaga sposób zaadoptowania metody powierzchni odpowiedzi (RSM) do zaplanowania eksperymentu? Jak działa metoda określana w pracy jako: "RSM DOE"? W jaki sposób przeprowadzono strojenie parametrów algorytmów optymalizacji? Czy strojenie wykonano w oparciu o 1 500 000 symulacji MES, czy w oparciu o 1 500 000 symulacji z wykorzystaniem metamodelu, czy też wykorzystano sumarycznie 3 miliony symulacji. Szerszego komentarza wymaga tu Rysunek 5.1.
5. W rozdziale 6.3 zatytułowanym „Results summary”, znalazły się wyniki optymalizacji przeprowadzonej przy użyciu algorytmów hybrydowych opartych na SPGA i MIGA, za pomocą technik MES lub metamodelowania, oraz sformułowane na ich podstawie wnioski. W rozdziale 7 pt. „Summary” zaprezentowano wyniki wraz z wnioskami dla optymalizacji przeprowadzonej już na rzeczywistych, przemysłowych przykładach. Czy nie należałoby utworzyć jednego rozdziału obejmującego powyższe treści? Natomiast wnioski, wdrożenia przemysłowe i zadania na przyszłość powinny znaleźć się w kolejnym rozdziale.

Uwagi szczegółowe:

- 1) Przegląd istniejących rozwiązań przedstawiony we wstępie jest pobieżny, hasłowy, właściwie ogranicza się do podania pozycji literaturowych. Wydaje się więc, że Doktorant sformułował tezę w oparciu o subiektywną wiedzę i doświadczenie, a nie krytyczną ocenę danych literaturowych.
- 2) Brak informacji dotyczących parametrów modelu MES, w tym np. rodzaj materiału, typu siatki, ilości elementów. W jaki sposób identyfikowano parametry materiałowe?
- 3) Na rysunku 3.2 metodę roju cząstek błędnie sklasyfikowano jako metodę ewolucyjną.
- 4) Rysunek 3.3 jest mało czytelny. Nie widać na nim zwrotów gradientów.
- 5) Wzór 3.11 nie jest jedynym wzorem określającym kierunek poszukiwania minimum w metodach gradientowych I rzędu. Metoda gradientów sprzężonych, która jest bardziej efektywna, niż metoda najszybszego spadku, określa kierunek poszukiwania w inny sposób.
- 6) W opisie metody BFGS brakuje informacji nt. postaci macierzy  $V$  w pierwszej iteracji metody (w pierwszej iteracji  $V$  jest macierzą jednostkową).
- 7) Zgodnie ze standardami edytorskimi każdy umieszczonych w tekście: obraz, tabela, wzór powinien być poprzedzony opisem i odsyłaczem. W przypadku 6.3 kolejność jest odwrócona, dla rys.5.10, 6.13 brak jest odsyłacza w opisie.
- 8) W opisie pod rysunkiem 6.13 podane wartości masy 0.429 i 0.438 nie pokrywają się z tymi na rysunku.

- 9) Rys.6.15 brak oznaczeń: a i b na rysunku.
- 10) Rys.6.7 brak oznaczeń: a i b na rysunku. Rozkład odkształceń nie jest widoczny, zakres skali powinien być zmniejszony, albo element powiększony
- 11) Czy rysunki 2.3, 2.11, 3.2, 3.3, 3.10 są autorstwa Doktoranta, ponieważ w ich opisie nie ma odwołania do literatury?

Powyższe zastrzeżenia mają charakter ogólnych uwag edytorskich i nie mają wpływu na ocenę merytoryczną pracy. Cel rozprawy został zrealizowany. Pozytywnie zweryfikowano postawioną tezę, poprzez:

- uznanie numerycznej analizy MES za poprawną do określenia wartości granicznej siły ściskającej, powodującej utratę stateczności amortyzatora,
- zaproponowanie i przetestowanie możliwości połączenia metod modyfikacji kształtu uchwytu z symulacjami MES, dostępnymi metodami optymalizacji matematycznej i zmodyfikowanymi dedykowanymi procedurami filtrującymi,
- redukcję masy wspornika amortyzatora w wyniku zastosowania w procedurach obliczeniowych algorytmu hybrydowego,
- zmniejszenie czasu obliczeń przez zastosowanie metamodelowania.

### 3. Wniosek końcowy:

Uwagi przedstawione w recenzji mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę merytoryczną pracy. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, zarówno w aspekcie technologicznym jak i praktycznym oraz spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 roku poz. 85, z późniejszymi zmianami). Istotne znaczenie ma przy tym wdrożenie metody w praktyce przemysłowej, prowadzące do minimalizacji ciężaru elementu amortyzatora i konkretnych korzyści ekonomicznych. Wnoszę o przyjęcie rozprawy Pana mgr inż. Przemysława Sebastjana i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'H. Pawłowski'.