

Poznań, dnia 12 września 2023

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgra inż. Sławomira Pary pt.:**  
***„Elasto-kinematic analysis of vehicle suspension with  
defectable joints for determination of selected operation  
parameters of utilized ball joints”***  
**(Analiza elastokinematyczna zawieszenia z więzami podatnymi dla  
ustalenia wybranych parametrów pracy przegubów kulistych)**

Opinia została opracowana w odpowiedzi na pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 3 lipca 2023 roku (M.00-109/2023), do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

Promotorem recenzowanej pracy jest dr hab. inż. Aleksander Kuranowski, prof. PK.

### **I. OCENA STRUKTURY PRACY I POZIOMU EDYTORSKIEGO**

Praca liczy 126 stron tekstu formatu A4, na co składa się streszczenie w języku polskim (23 strony), spis treści, cztery rozdziały i spis oznaczeń w języku angielskim (88 stron), wykaz źródeł (8 stron, .98 pozycji), streszczenie w języku angielskim (1 strona) oraz załączniki (6 stron).

Praca napisana jest w języku angielskim, co uzasadnia obszerne streszczenie w języku polskim.

W pracy można wyodrębnić dwie zasadnicze części. W pierwszej części (rozdział 1, strony 26-39), wskazano na istotność podjętego zagadnienia (podrozdział 1.1), sformułowano cel pracy (podrozdział 1.2) dokonano analizy stanu wiedzy (podrozdział 1.3)

oraz przedstawiono opis aparatury badawczej (podrozdział 1.4). Druga część pracy (strony 40-109) obejmuje modelowanie i badania własne wraz z analizą ich wyników (rozdziały 2 i 3) oraz podsumowanie osiągniętych rezultatów i sformułowanie kierunków dalszych prac (rozdział 4).

#### **Uwagi dotyczące struktury pracy:**

- W mojej ocenie opis aparatury powinien być zawarty w rozdziale prezentującym badania własne, w ramach opisu metodyki tych badań.
- Zręczniejsze byłoby wyprowadzenie celu pracy (1.2) z analizy stanu wiedzy (1.3) – a więc odwrotna kolejność tych podrozdziałów.

Struktura drugiej części pracy nie budzi zasadniczych zastrzeżeń.

Pod względem edytorskim praca jest uporządkowana, Autor konsekwentnie stosuje to samo formatowanie do określonych poziomów struktury tekstu i obiektów w nim osadzanych (rysunki, tabele i wzory są numerowane).

#### **Uwagi edytorskie:**

- W pracy stosowana jest numeracja czteropoziomowa, co nie wydaje się konieczne (wystarczyłyby numeracja trzypoziomowa i śródtytuły nienumerowane), ale skoro już są podpunkty 2.8.1.1 itd., to powinny być ujęte w spisie treści (w którym zamieszczono tytuły rozdziałów, podrozdziałów i punktów, a więc tylko trzy poziomy numeracji).
- W niektórych miejscach brakuje przecinków – np. w drugim akapicie na str. 4 brakuje kilku; str. 20 „quasistatyczny ale”; „bibliografii ale”.
- Zamiast półpauzy „-” czasami stosowany jest łącznik „-” – np. str. 1 „podatnych - stabilizatory”; punktory na stronach 21-22, 60, 106-108.
- Na stronie 10 oznaczenia 'b' i 'd' (brak w spisie oznaczeń na str.110) są w apostrofach, co jest wyjątkiem, ponieważ pozostałe oznaczenia w pracy (np. „A i B” na tej samej stronie) nie są w ten sposób wyróżniane (dla odróżnienia oznaczeń od tekstu najczęściej używa się kursywy).
- Spis oznaczeń powinien być uporządkowany alfabetycznie, osobno litery greckie i łacińskie.

**Podsumowując uważam, iż praca ma akceptowalną strukturę redakcyjną i została poprawnie opracowana pod względem edytorskim.**

## II. OCENA TREŚCI PRACY

Tytuł pracy odpowiada podjętej problematyce.

Streszczenie w języku polskim częściowo jest tłumaczeniem całych fragmentów pracy w języku angielskim (np. na stronach 20-23 zawarto treści zapisane w języku angielskim na stronach 106-109), a częściowo skrótem informacji zawartych w pracy.

W podrozdziale 1.1 przedstawiono genezę pracy, słusznie argumentując, że stan elementów zawieszenia ma znaczący wpływ na bezpieczeństwo pojazdu. W podrozdziale 1.2 prawidłowo sformułowano cel pracy, który wynika z poprawnie przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu (1.3). Podrozdział 1.3 zawiera przegląd literatury, który jest dość lapidarny, ale syntetycznie ujmuje 65 publikacji z zakresu podjętej problematyki. Rzeczowe podsumowanie analizy stanu wiedzy stanowiło podstawę do określenia obszaru niewiedzy w zakresie: określania parametrów pracy przegubów kulistych stosowanych w zawieszeniach McPherson i obliczania obciążeń jakie na nie działają podczas różnych stanów ruchu, a także metod numerycznych pozwalających obliczyć naprężenia wewnątrz przegubu kulistego, z uwzględnieniem wszystkich elementów przegubu. Tak określony obszar badawczy poza walorami naukowymi ma istotne znaczenie praktyczne, co uzasadnia cel pracy sformułowany w podrozdziale 1.2. W podrozdziale 1.4 w sposób wystarczających opisano cztery urządzenia pomiarowe (natomiast to nie jest najlepsze miejsce na taki opis).

W rozdziale drugim przedstawiono przede wszystkim własny model analityczny zawieszenia McPhersona, badania własne oraz autorską procedurę estymacji parametrów zawieszenia. Do modelowania wykorzystano metodę wektorową, co jest zaletą pracy, gdyż w odróżnieniu od metody macierzowej, daje ona rozwiązanie analityczne w postaci jawnych funkcji wektorowych, które można wprowadzić do programów umożliwiających obliczenia wektorowe i analizować wpływ poszczególnych cech zawieszenia na pracę przegubu. Badania własne zostały właściwie przeprowadzone, a obejmowały m.in.: pomiary geometryczne zawieszenia (punkty mocowań, długości ogniw, maksymalne wychylenie trzpienia przegubu) oraz badania składu chemicznego i twardości przegubu. Dla wybranego pojazdu w interesujący sposób wyznaczono obciążenia zawieszenia w różnych stanach ruchu pojazdu (jazdy na wprost, jazdy po łuku, hamowania).

Rozdział trzeci zawiera nie budzące zastrzeżeń analityczne i numeryczne studium obciążeń przegubu kulistego, prowadzące do uzyskania podobnych wartości naprężeń.

W rozdziale czwartym dokonano syntetycznego podsumowania rozważanych zagadnień, z którego wynika, że cel określony w podrozdziale 1.2 został osiągnięty. Wysznięto również uzasadnione propozycje kierunków dalszych badań.

### Osiągnięcia Kandydata przedstawione w rozprawie:

- Opracowanie metodyki rozwiązywania zagadnień związanych z kinematyką i zależnościami siłowymi zachodzącymi w przegubach kulistych zawieszonych z uwzględnieniem podatnego charakteru pozostałych więzów. Zastosowana metoda analityczna oparta na rachunku wektorowym pozwala na prześledzenie wpływu pojedynczych cech zawieszenia na pracę przegubu i tym samym na ukierunkowany dobór jego cech kinematycznych i wytrzymałościowych. W zakresie możliwości cząstkowej analizy elementów zawieszenia, rozwiązanie to ma przewagę nad popularnymi programami komercyjnymi.
- Opracowanie procedury obliczeniowej służącej do estymacji współrzędnych oraz wymiarów elementów zawieszenia wraz z procedurą wykonania pomiarów i sposobem analizy danych. Dla różnych kątów pochylenia koła wywołanych ugięciem zawieszenia, a co za tym idzie zmianą długości kolumny McPhersona, różnice między obliczeniami a pomiarami mieszczą się w zakresie 5% (co jest poziomem zadowalającym).
- Opracowanie dwóch modeli do obliczeń wytrzymałościowych (o różnym stopniu uproszczenia), pozwalających na porównanie dla badanego pojazdu obliczonych sił działających na przegub z jego wytrzymałością (zadanie wymagało także badań materiałowych).

### Uwagi krytyczne i dyskusyjne:

- Streszczenie w języku polskim (23 strony) nie jest w pełni spójne z pracą.
  - Cel pracy przedstawiony w streszczeniu (str. 4, „*Celem pracy jest przedstawienie metodyki rozwiązywania zagadnień związanych z kinematyką i zależnościami siłowymi zachodzącymi w przegubach kulistych zawieszonych przy uwzględnieniu podatnego charakteru pozostałych więzów*”) wskazuje wyłącznie aspekt dotyczący metodyki, więc jest węższy od celu zapisanego w podrozdziale 1.2 (str. 30 „*an analysis of the ball joint utilized in the tested suspension to calculate the real tilt and rotation angle of the stud and the reaction forces acting on the joint*”).
  - Wzorowi (2.3) w streszczeniu odpowiada wzór (3), który jest przekształceniem wzoru (1), o którym nie ma mowy w anglojęzycznej części pracy; podobnie z powołaniem się na wzór Chace'a i odnośnik literaturowego [14] – w streszczeniu jest informacja, że został wykorzystany czterokrotnie, a nie znalazłem go w anglojęzycznej części pracy.

- o W rozdziale trzecim narracja przebiega inaczej, niż w streszczeniu, co jest widoczne np. w kolejności rysunków: Rys. 10 odpowiada Figure 3.6, Rys. 11 – Figure 3.14, a Rys. 12 – Figure 3.3 i 3.5.
- Zważywszy na wielowątkowość pracy, czytelność przedstawionego w niej wywodu byłaby większa, gdyby po wskazaniu celu pracy przedstawiono precyzyjny plan jego osiągnięcia.
- W tytule i celu pracy (zapisanym w streszczeniu polskojęzycznym), a także w tekście dominuje określenie „przegub kulisty”, natomiast użyto także określenia „przegub kulowy” (str. 4). W obrębie pracy warto dbać o jednolitą terminologię.
- Na str. 11 napisano: „Dokładność (...) mieści się w zakresie 5%”, a zważywszy, że dokładność to zgodność wyniku z rzeczywistością, to raczej wynosi 95%.
- Niektóre podpisy pod rysunkami są niepełne – np. w podpisie rys. 6 mogą być wątpliwości o jaką kolumnę chodzi; nie sprecyzowano model czego przedstawiają rysunki 9 i 12; w podpisie Figure 2.10 nie napisano estymacji czego dotyczy „flow chart”; podobnie nie określono obiektów przedstawionych na Figure 3.2, 3.3, 3.12
- Na str. 3 napisano: „Przyczyny wprowadzenia podatnych elementów gumowo-metalowych do zawieszenia są następujące: (...)” (i analogiczny tekst w języku angielskim na str.27), natomiast nie podano odnośnika literaturowego.

#### Pytania:

1. Przeprowadzona analiza elastokinematyczna ma charakter quasistatyczny. W jaki sposób przeprowadzić można eksperyment dynamiczny? Czy należałoby się spodziewać dużych różnic w uzyskanych wynikach i jakie mogłyby być ich źródła?
2. Na str. 1 napisano: „Problemem jest to, że elementy zawieszonych obciążanych w ruchu ulegają przyspieszonemu zużyciu” – W jakiej sytuacji ulegają normalnemu zużyciu?
3. Na str. 1 napisano: „te wypadki, które związane są ze stanem technicznym pojazdów nie należą do częstych” – Czy Autor zna statystyki wspierające tę tezę? Jaka może być przyczyna niepewności takiej statystyki?
4. Na str. 4 napisano: „Już pierwsze prace rozpoznawcze wykazały, że kąt wychylenia trzpienia jest przesadnie duży” – Do jakich „prac rozpoznawczych” odnosi się to zdanie?

Mimo wymienionych uwag szczegółowych, pracę oceniam pozytywnie ze względu na:

- umiejętne wykorzystanie współczesnej literatury specjalistycznej oraz sformułowanie oryginalnych wniosków;
- szeroki zakres pracy obejmujący studium analityczne i numeryczne, modelowanie i symulację oraz badania;
- interesujący i wartościowy materiał o charakterze aplikacyjnym dla projektantów zawieszek (opracowane metody pozwalają na precyzyjniejsze określenie kątów wychyleń we wszystkich płaszczyznach i określenie występującego wówczas stanu obciążenia).

**Treść pracy w sposób zrozumiały i merytorycznie poprawny opisuje szeroki zakres przeprowadzonych przez Kandydata badań i analiz, a wykazane w uwagach niedoskonałości nie umniejszają znacząco wartości naukowej pracy.**

### III. KONKLUZJA

Praca mgr inż. Sławomira Pary pt.: „*Elasto-kinematic analysis of vehicle suspension with defectable joints for determination of selected operation parameters of utilized ball joints*” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r (Dz. U. z 2016 r. poz. 882), a w szczególności:

- zgodnie z art. 13. 1 stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna (dawniej budowa i eksploatacja maszyn) oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej;
- zgodnie z art. 13 odpowiednio punkty 2, 5, i 6, ma formę maszynopisu; jest przedstawiona w języku angielskim; jest opatrzona streszczeniem w języku polskim i angielskim.

**Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Sławomira Pary, jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Michał Libera