

Dr hab. inż. Jacek Buśkiewicz  
Politechnika Poznańska  
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania  
Instytut Mechaniki Stosowanej  
ul. Jana Pawła II 24, 60-965 Poznań  
e-mail: [jacek.buskiewicz@put.poznan.pl](mailto:jacek.buskiewicz@put.poznan.pl)  
tel.: (61) 6652619

Poznań, 05.06.2019 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka Kwietniewskiego nt.

### **Analiza i synteza kinematyki mechanizmu zawieszenia i kierowania kół samochodu**

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Tadeusz Bil, prof. nadzw. Politechniki Koszalińskiej,  
promotor pomocniczy: dr inż. Zbigniew Budniak.

Recenzję opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej,  
dr. hab. inż. Błażeja Bałusza z dnia 05.04.2019 r.

### **Ogólna charakterystyka pracy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Marka Kwietniewskiego liczy 94 strony. Tematyka pracy lokuje się w obszarze inżynierii mechanicznej i dotyczy ona bardzo ważnego problemu projektowania i analizy działania układów zawieszenia kół samochodowych. Celem przewodnim jest poprawa działania zawieszenia poprzez zamianę par kinematycznych. Autor rozprawy powołuje się na 60 pozycji literaturowych. Mgr Marek Kwietniewski jest współautorem dwóch opracowań naukowych w czasopiśmie *Autobusy* znajdującym się w części B wykazu MNiSW czasopism naukowych. Jest on również współautorem dwóch zgłoszeń patentowych. Autor powołuje się na ponad 20 publikacji z ostatnich dziesięciu lat, ponad 20 cytowanych prac dotyczy zawiesznień samochodów, co świadczy o Jego wiedzy na temat najnowszych osiągnięć w tej dziedzinie.

Autor postawił tezę badawczą, iż "*w mechanizmach zawieszenia poprzez celową zamianę złożonych par kinematycznych na pary o niższej ruchliwości, istnieje możliwość uzyskania pożądanej zmiany funkcjonowania tych mechanizmów*". Wskazał trzy cele uszczegóławiające postawioną tezę i będące pośrednimi etapami prowadzącymi do jej udowodnienia.

Główną część rozprawy autor podzielił na pięć rozdziałów: wprowadzenie, przegląd obecnego stanu wiedzy, hipoteza i cel rozprawy, modele matematyczne zawiesznień oraz podsumowanie. Opiniowana rozprawa zawiera również bibliografię, spisy rysunków i tabel oraz dwa załączniki. Istotny ze względu na naukowy wkład autora rozdział czwarty zawiera opis modelu geometrycznego kolumny MacPhersona, rozwiązania numeryczne i ich krytyczną analizę. W kolejnym podrozdziale

zaproponowano modyfikację układu zawieszenia poprzez zamianę par kinematycznych. Zaprezentowano również propozycję zawieszenia bezwahaczowego wraz z właściwymi obliczeniami.

### **Krytyczna ocena pracy**

We wprowadzeniu Autor wyjaśnia podstawowe definicje związane z układem zawieszenia oraz podaje podział zawieszonych. Wymienia parametry geometryczne charakteryzujące położenia koła względem nadwozia. Te same wielkości są szerzej wyjaśnione i zilustrowane rysunkami w kolejnych rozdziałach. Wydaje się, że większa część pierwszego rozdziału powinna znaleźć się w podrozdziale 2.4 *Pojęcia podstawowe*, natomiast brakuje we wprowadzeniu chociażby krótkiej wzmianki na temat motywacji do podjęcia się takiej tematyki i wskazania problemu badawczego pracy.

Rozdział drugi rozpoczyna zwarty opis historii rozwoju zawieszonych pojazdów. Następnie przedstawiona jest kolumna MacPhersona. Na tym etapie pracy opis nie koresponduje z rysunkiem zawieszenia, na którym brakuje wskazania wymienionych w tekście elementów. Kolejny podrozdział dotyczy zawieszonych wielowahaczowych. W następnym podrozdziale przywołane i wyjaśnione zostały najważniejsze pojęcia (para kinematyczna, klasa pary kinematycznej, ruchliwość, macierze transformacji) z punktu widzenia tematu pracy. Rozdział ten kończy podrozdział poświęcony kinematyce zawieszonych, w którym skupiono się na pożądanym cechach geometrycznych układu zawieszenia ze względu na zapewnienie właściwego kierowania pojazdem. Zawarto w nim uwagę na temat zmiany parametrów geometrii ustawienia kół w zawieszeniu MacPhersona podczas skrętu na skutek ruchu amortyzatora. Fragment ten stanowi punkt wyjścia do sformułowania celów pracy.

Do tej części można mieć następujące uwagi:

- Zawarto wiele odniesień do źródeł internetowych. Jest to uzasadnione w przypadku konieczności opisu części mechanicznych układu zawieszenia. W pracy jednak znajdziemy również definicję pary kinematycznej przytoczoną ze strony internetowej.
- Rozdział 1. i 2. mogłyby zostać lepiej uporządkowane ze względu na czytelną i logiczną prezentację kolejnych zagadnień. Opis kolumny MacPhersona, jej schemat ideowy oraz kinematyczny są umiejscowione w różnych miejscach. Pojęcia podstawowe znajdziemy we wprowadzeniu jak i w przeglądzie obecnego stanu wiedzy.

Część pracy poświęcona współczesnym problemom projektowania zawieszonych samochodowych w związku z rozwojem motoryzacji jest poparta wieloma pozycjami literaturowymi i właściwie omówiona w kontekście wyboru problemu badawczego, uzasadnienia jego aktualności i ważności z aplikacyjnego punktu widzenia.

W rozdziale trzecim sformułowano tezę i cele badawcze. Sformułowanie złożone pary kinematyczne należałoby zastąpić stosowanym opisem pary kinematycznej klasy trzeciej. W celu

drugim należałoby dookreślić wymagania stawiane zmodyfikowanej konstrukcji zawieszenia MacPhersona.

Właściwą część pracy rozpoczyna rozdział czwarty prezentujący modele matematyczne zawieszek. W pierwszym podrozdziale Autor wykonał analizę geometryczną istniejącego rozwiązania kolumny MacPhersona. W tym miejscu znajduje się pełny opis wielkości geometrycznych wraz ze schematem. Pokazano ciąg macierzowych operacji matematycznych prowadzących do wyznaczenia kątów skrętu koła i pochylenia koła w funkcji długości amortyzatora i przesunięcia przegubu drążka układu kierowniczego. Przyjęto wymiary i zaprezentowano właściwe wykresy pokazujące zmianę kąta skrętu, określanego jako błąd geometryczny układu kierowniczego, oraz kąta pochylenia koła w zależności od długości amortyzatora i przemieszczenia drążka kierowniczego.

Uwagi do tej części są następujące.

- Bardzo dyskusyjna jest uwaga, iż wymiary geometryczne w niewielkim stopniu wpływają na dynamikę zawieszenia, tym bardziej, że nie poparta została ona żadnymi źródłami literaturowymi.
- Nie podano źródła wymiarów kolumny.
- Zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na schemacie kolumny, kąty pochylenia kolumny wokół osi powinny być nazwane kątami obrotu względem osi.
- W równaniu (16) zamiast  $L_2$  powinno być  $L_3$ . Nie podano wymiaru  $L_5$ .

Wartością tej części pracy jest przeprowadzenie złożonych obliczeń matematycznych prowadzących do uzyskania rozwiązań i stanowiących punkt wyjścia do dalszych rozważań. Istotną do dalszych rozważań jest obserwacja, że maksymalna zmiana kąta skrętu występuje przy maksymalnym przemieszczeniu punktu drążka kierowniczego (maksymalnym kącie skreńnięcia koła). W kolejnym podrozdziale jako propozycję poprawy właściwości geometrycznych układu Autor proponuje zmianę liczby i rodzaju par kinematycznych. Wprowadza dwa odpowiednio zorientowane przeguby obrotowe w miejsce przegubu kulistego, w wyniku czego usuwa ruchliwość lokalną. Należy tu podkreślić fakt, iż zmiana ta dotyczy układu kierowniczego, a nie układu zawieszenia. Wzorem wcześniejszego podrozdziału dokonano właściwych przekształceń matematycznych w celu wyznaczenia kątów skrętu koła i pochylenia koła w funkcji długości amortyzatora i przesunięcia przegubu drążka kierowniczego. Przyjęto wymiary geometryczne układu, różne od wyjściowego układu w miejscach zmian w konstrukcji. Wykonano właściwe obliczenia i zilustrowano je wykresami. Następną propozycją modyfikacji układu jest wprowadzenie pięciu przegubów obrotowych w miejsce przegubu kulistego w układzie kierowniczym. Powtórzono metodę postępowania, w wyniku której otrzymano właściwe wyniki. Porównano zmiany w geometrii ustawienia kół dla wyjściowej kolumny oraz konstrukcji zmodyfikowanych. Mimo że nie zaproponowano żadnych matematycznych miar oceny rozwiązań, z tabeli 2 odczytać można, iż modyfikacja zmniejszyła niepożądane błędy geometryczne układu

kierowniczego oraz zmiany kąta pochylenia koła w funkcji długości amortyzatora i położenia końcowego przegubu drążka kierowniczego.

Na podstawie przeprowadzonych modyfikacji wydaje się, iż dokonano zmian w konstrukcji układu kierowniczego, a nie układu zawieszenia. W ten sposób zmniejszono maksymalny kąt skręcenia koła w porównaniu z wyjściową konstrukcją, co można odczytać w tabeli 2, a różnica ta w przypadku drugiej modyfikacji wynosi prawie  $10^\circ$ . Jak wcześniej zauważono na rysunkach 12 i 13, w kolumnie wyjściowej maksymalny błąd układu kierowniczego wywołany zmianą długości amortyzatora narasta szybko przy zbliżaniu się do maksymalnej wartości kąta skręcenia koła (wysunięcia drążka kierowniczego). Rodzi się zatem pytanie, *czy zmniejszenie niepożądaney zmiany kąta pochylenia i kąta skręcenia koła nie jest wynikiem zmniejszenia maksymalnego kąt skręcenia w zmodyfikowanych układach kierowniczych?* Jeśli tak, efekt ten można uzyskać prostszymi środkami, ograniczając zakres kąta skręcenia kierownicy.

Brakuje prezentacji znanych metod syntezy geometrycznej, które zostały opracowane w celu eliminacji błędu układu kierowniczego. Warto by je podać ze względu na fakt, iż otrzymane rozwiązania są często konfrontowane z ograniczeniami konstrukcyjnymi, które nierzadko uniemożliwiają ich zastosowanie. Wartościowa byłaby również dyskusja własnych propozycji na tle innych rozwiązań.

Nie podano metody, za pomocą której ustalono dodatkowe wymiary pomiędzy wprowadzonymi przegubami. Czy zostały one określone metodą prób i błędów, czy może zastosowano jakąś procedurę optymalizacyjną.

Ze względu na to, iż ruch kół kierowanych jest wzajemnie związany, można zadać pytanie, czy zmiana układu kierowania jednego koła wymusza zmianę w konstrukcji układu drugiego koła ze względu na konieczność zachowania chwilowego środka obrotu w ruchu pojazdu?

Pozostałe uwagi do tej części dotyczą edycji. W wykazie oznaczeń jest  $L_4=DE$ , a powinno być  $|DE_1|$ . W macierzy (45) pojawiają się wielkości wcześniej niewprowadzone np:  $C\lambda S\mu$ , co może być skrótowym zapisem funkcji trygonometrycznych. Błędy w zapisie występują również w równaniu (49). Niejasne jest pierwsze zdanie pod tabelą 2. na stronie 55.

W ostatnim podrozdziale przedstawiono propozycję mechanizmu układu kierowania dla zawieszenia bezwahaczowego. Zaproponowano schemat układu kierowania. Zapewnienie stałej orientacji osi obrotu koła (zwrotnicy) powoduje, że nie następuje zmiana kąta skrętu i pochylenia koła w czasie pracy amortyzatora. Wniosek ten został potwierdzony wynikami obliczeń numerycznych. Nie podano pełnego kąta skrętu koła, choć można próbować go odczytać z rysunku 33.

Całość kończy podsumowanie przeprowadzonych analiz i uzyskanych wyników. Autor mógłby zaprezentować zarys dalszych badań w zakresie modelowania i symulacji zjawisk towarzyszących pracy zawieszenia, uzupełniających analizę kinematyczną i poprzedzających badania eksperymentalne.

W pracy zauważono również błędy edytorskie:


- Ogólna uwaga dotyczy brak stosowania konwencji zapisu zmiennych i operacji matematycznych. Brakuje jednolitej formy zapisu zmiennych. Zmienne są zwyczajowo pochylone i taki zapis jest stosowany w równaniach, nie jest on jednak stosowany w opisie zmiennych. Właściwe oznaczenie stosuje się również do macierzy ( $[A]$  lub pogrubione pismo proste  $A$ ), podczas gdy w pracy stosowane są różne zapisy. Wiele wyrażień zawiera błędy.
- Niektóre pozycje w bibliografii (np. [22,24]) zawierają niepełne dane – brak pełnego tytułu, miejsca wydania, itd.
- Praca zawiera drobne błędy językowe, które nie utrudniają zrozumienia pracy.

### **Główne osiągnięcia pracy**

Doktorant podjął się rozwiązania bardzo złożonego matematycznie zagadnienia. W celu optymalizacji wymiarów mechanizmu wyprowadził i rozwiązał nieliniowe układy równań algebraicznych, rozwiązał zatem zadanie syntezy strukturalnej i geometrycznej. Dyskusyjne jest, czy właściwie zinterpretował wszystkie wprowadzone modyfikacje i uzyskane wyniki, niemniej jednak osiągnął rozwiązania, które mogą stanowić podstawę do zmian w konstrukcji kolumny. Wykazał również, iż zamiana par kinematycznych może skutkować pożądanymi efektami, choć wskazana byłaby większa ostrożność w końcowej ocenie wyników otrzymanych dla rozważanego układu zawieszenia.

### **Wniosek końcowy**

Uwagi wymienione w niniejszej recenzji mają na celu wskazanie pewnych luk w rozważaniach i potrzebę głębszej analizy. Wiele uwag ma charakter dyskusyjny. Nie umniejszają one mojej pozytywnej oceny rozprawy, która może mieć wymiar praktyczny. Na podkreślenie zasługują: umiejętność Autora modelowania złożonych mechanizmów przestrzennych, znajomość matematycznych procedur rozwiązywania nieliniowych układów równań algebraicznych i metod optymalizacyjnych oraz umiejętność zastosowania tej wiedzy do analizy problemów inżynierskich. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, iż rozprawa doktorska pt. "*Analiza i synteza kinematyki mechanizmu zawieszenia i kierowania kół samochodu*" spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim w stosownej Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym i wnoszę o dopuszczenie jej Autora mgr. inż. Marka Kwietniewskiego do publicznej obrony. Rozprawa doktorska umiejscowiona jest w dyscyplinie naukowej *inżynieria mechaniczna*.



Dr hab. inż. Jacek Buśkiewicz