

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Faryńskiego  
pt. „ Opracowanie i badania symulacyjne algorytmu sterowania skrętem kół  
w samochodzie 4WS”.**

**Podstawa sporządzenia opinii:** pismo Prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, Wojskowej Akademii Technicznej z dnia 22.12.2023 r.

### Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa o wyżej wymienionym tytule jest pracą o objętości 188 stron i składa się z 9 rozdziałów, w tym: Literatury, ośmiu Załączników, Spisu rysunków i Spisu tabel. Wykaz literatury obejmuje 205 pozycji, w tym: 178 pozycji drukowanych, 18 źródeł internetowych oraz 9 norm i instrukcji. Spośród wszystkich cytowanych źródeł 173 to pozycje opublikowane w języku angielskim.

Autor podejmuje w pracy bardzo ciekawy i wartościowy problem naukowy zarówno z punktu widzenia teoretycznego, jak i praktycznego. Problem opracowania algorytmu automatycznego sterowania kół samochodu w ostatnich latach, gdy w zasadzie wszystkie firmy samochodowe pracują intensywnie nad koncepcjami opracowania pojazdów autonomicznych, jest tematem bardzo aktualnym i podejmowanym w wielu publikacjach naukowych. Układ sterowania ruchem pojazdu (podobnie jak realizujący tę funkcję kierowca) musi zapewnić realizację dwóch podstawowych zadań: realizację manewrów oraz stabilizację ruchu. Pierwsze z tych zadań, jeśli jest realizowane przy małych prędkościach (np. manewry na parkingu, przy garażu itp.) jest relatywnie proste. Jest ono trudniejsze, jeśli dotyczy realizacji różnorodnych manewrów podczas szybkiej jazdy, lub jazdy po krętych drogach. Staje się ono ekstremalnie trudne, jeśli bardzo złożone i szybkie manewry należy wykonywać podczas sytuacji zagrożenia wypadkowego. Ponieważ samochód jest bardzo złożonym układem dynamicznym, to również jako trudne, a w wielu przypadkach, jako bardzo trudne należy uznać drugie zadanie czyli stabilizację ruchu, szczególnie podczas jazdy z dużymi prędkościami.

W zdecydowanej większości pojazdów kołami kierowanymi są koła przednie (system określany symbolem 2WS). Automatyzacja tego systemu, z powodów wymienionych powyżej, a także ze względu na niezbędność zapewnienia bardzo wysokiej niezawodności poprawnego działania, jest zadaniem trudnym. Znacznie trudniejszym zadaniem jest automatyzacja

samochodów określanych, jako 4WS, czyli z kołami kierowanymi dwóch osi, a takiego właśnie zadania podjął się Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Powyższe krótkie uzasadnienie pokazuje, że wybór tematu rozprawy należy uznać za bardzo trafny. Pozytywnie należy również ocenić wybór zastosowanych w pracy metod badawczych oraz konsekwentnie realizowany proces badawczy. Doktorant zbudował model matematyczny samochodu z kołami kierowanymi dwóch osi oraz sterownikiem zmiany pasa ruchu. W następnym kroku przeprowadził identyfikację charakterystyk i parametrów opracowanego modelu matematycznego, a końcowym etapem były badania symulacyjne opracowanej koncepcji systemu sterowania.

### **Analiza treści rozprawy**

Rozdział pierwszy to Wstęp, w którym Autor przedstawia wprowadzenie do problematyki tworzenia samochodów typu 4WS oraz genezę rozprawy. Drugi podrozdział, to studium literaturowe zagadnień sterowania w samochodach z kołami kierowanymi dwóch osi. Wstęp kończy przedstawienie koncepcji rozprawy, z zaznaczeniem, że tworzony algorytm dotyczyć będzie klasycznej koncepcji samochodów 4WS, czyli takiej, że skręt kół tylnych wyznaczany będzie na podstawie skrętu kół przednich z wykorzystaniem odpowiedniej charakterystyki przełożenia zależnej od prędkości. W części końcowej tego rozdziału sformułowany jest cel pracy, hipoteza, metodyka badań oraz zakres pracy.

Część badawczą pracy rozpoczyna rozdział drugi – najobszerniejszy rozdział pracy, poświęcony opracowaniu modeli matematycznych niezbędnych dla prowadzenia dalszych badań i realizacji sformułowanego celu pracy. Proces modelowania obejmuje tworzenie trzech modeli składowych (można tu użyć określenia: trzech modeli częściowych) modelu pełnego. Pierwszy, to model pojazdu rzeczywistego uwzględniający dynamikę poprzeczną samochodu, rozbudowany o element aerodynamiki oraz dynamikę układu kierowniczego. Drugim jest model sterownika zmiany pasa ruchu w wersji transmitancyjnej, a trzeci, to model układu pomiarowego, dostarczającego niezbędne sygnały do sterownika. W rozdziale tym przeprowadzono ponadto analizy wpływu wybranych parametrów modelu samochodu oraz parametrów charakteryzujących jego ruch na „parametry transmitancyjne”. Przedstawiono model matematyczny generatora sygnałów referencyjnych, algorytm sterowania oraz modele regulatorów.

W rozdziale trzecim przedstawiona jest metodyka identyfikacji parametrów wykorzystywanego w pracy rowerowego modelu samochodu. Doktorant wyodrębnił dwa rodzaje identyfikacji, określone jako *online* oraz *offline*. Pierwszy z wymienionych rodzajów identyfikacji został przedstawiony w postaci krótkiego opisu schematu działania, gdyż Autor nie zajmował się w pracy tym zagadnieniem. Określona jako *offline*, to zrealizowana rzeczywiście na potrzeby pracy klasyczna identyfikacja parametrów modelu dynamicznego samochodu. Parametry układu kierowniczego zostały zaczerpnięte z literatury. Przeprowadzone badania eksperymentalne wykorzystano również do uzyskania rzeczywistych sygnałów sterujących.

Kolejnym, przedstawionym w rozdziale czwartym, krokiem w procedurze realizacji badań jest opis badań symulacyjnych opracowanej koncepcji systemu sterowania. Doktorant badania te podzielił na dwa etapy. Pierwszy etap to wstępne badania symulacyjne modelu samochodu 4WS ze sterownikiem zmiany pasa ruchu. Etap drugi, to symulacyjne badania analizy wrażliwości na zmianę wybranych parametrów modelu oraz na zakłócenia sygnałów mierzonych w układzie. Celem tych badań była weryfikacja poprawności działania zaproponowanego układu sterowania oraz czy opracowany algorytm jest w stanie sobie poradzić w przypadku występowania niedokładności pomiędzy modelem referencyjnym stosowanym w sterowniku, a wykorzystywanym modelem samochodu i z występowaniem zakłóceń sygnałów mierzonych.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie pracy i uwagi końcowe. Sformułowane są w nim wnioski o osiągnięciu zakładanego celu pracy oraz o potwierdzeniu sformułowanej hipotezy. Autor wskazał również kierunki dalszych badań.

Rozdział szósty, to wykaz literatury, zaś w rozdziale siódmym zawarte jest siedem załączników przedstawiających: wyprowadzenie równań ruchu modelu rowerowego 4WS, wyprowadzenie transmitancji dla modelu rowerowego 4WS, analiza zależności parametrów transmitancyjnych od prędkości, symulacje na zredukowanym i pełnym transmitancyjnym modelu rowerowym 4WS, opis aparatury pomiarowej służącej identyfikacji *offline*, analiza wpływu prędkości na współczynniki  $K_A$  i  $K_B$  oraz testowanie procedur numerycznych.

### **Uwagi krytyczne dotyczące rozprawy**

Praca jako całość, pod względem merytorycznym zasługuje na pozytywną ocenę. Napisana jest bardzo starannie i niemal nie zawiera błędów językowych i edycyjnych. Jednak Autor nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć. Uwagi krytyczne przedstawiam poniżej, w kolejności pojawiania się w tekście. Chciałbym zaznaczyć, że w większości są to drobne uchybienia.

1. Str. 13, dwie pierwsze linie pod rysunkiem: „Układ KPD funkcjonuje jako system dynamiczny, którego elementy działają z procesami przejściowymi i są ze sobą posprzęgane.” Wymienione w drugiej części zdania cechy, to naturalne cechy wszystkich układów dynamicznych, a nie jakieś wyjątkowe cech układu Kierowca – Pojazd – Droga, co sugeruje styl zdania.
2. Str. 26, rozdz. 1.2 – studium literaturowe o objętości 8,5 strony to w pracy doktorskiej zdecydowanie za mało. Szczególnie, że na tych kilku stronach Autor cytuje aż 148 pozycji literaturowych (w tym niektóre kilkakrotnie). Ten rozdział sprawia wrażenie katalogu, a nie analizy treści publikacji (założeń metod, podobieństw, różnic). To jest analiza bazy danych, przedstawionej w pozycji [38], gdzie być może są dostępne informacje podane w rekordzie, które siłą rzeczy muszą być liczbowo ograniczone i skrótowe. Na przykład na str. 28, linie 16<sup>g</sup> – 21<sup>g</sup>, gdzie niespełna 5 linii komentarza dotyczy 32 pozycji literaturowych, a na str. 32, linie 7<sup>g</sup> – 14<sup>g</sup>, na niespełna 7 liniach jest komentarz do 18 pozycji literaturowych.

Sytuację poprawia w pewnym sensie fakt, że rozdz. 1.1 de facto ma też w dużej części charakter studium literaturowego. Reasumując, ja odbieram to nie jako analizę literatury, tylko katalog.

3. Str. 34, linia 4<sub>d</sub>, str. 35, linia 3<sub>d</sub> i str. 37, linia 13<sup>9</sup> – przedstawia Pan „metodykę” a nie „metodologię”. Metodologia to nauka o metodach, a Pan przedstawia metodykę (można też powiedzieć: metodę), które w pewnym sensie są synonimem „sposobu postępowania”.
4. Str. 35, linie 14<sup>8</sup> i 15<sup>8</sup> – „... algorytm automatycznego sterowania ..., który zapewniałby proces zmiany pasa ruchu i stabilizację ruchu w szerokim zakresie prędkości.”. Nigdzie w pracy nie zostało wskazane o jaki konkretnie (lub choćby w przybliżeniu) zakres prędkości chodzi i dla jakiej klasy pojazdów.
5. Str. 35, linie 7<sup>8</sup> i 14<sup>8</sup> – informacja zawarta w , linii 7<sup>8</sup> jest sprzeczna z informacją podaną w linii 14<sup>8</sup>. Jak można zakładać, że algorytm będzie się odnosił do pojazdu autonomicznego i nieco dalej ograniczać zakres manewrów tylko do zmiany pasa ruchu. Algorytm, który nie będzie zapewniał realizacji szerszej gamy manewrów, w tym dla sytuacji zagrożenia wypadkowego nie może być dedykowany dla pojazdów autonomicznych.
6. Str. 45, pierwszy akapit: uzasadnieniem wyprowadzania w pracy równań ruchu modelu rowerowego jest to, że „... rzadko spotyka się jego wyprowadzenie od podstaw.”. Może rzadko, ale jednak można znaleźć. Zatem wyprowadzanie równań ruchu najpopularniejszego modelu rowerowego nie jest oryginalnym osiągnięciem Doktoranta, a więc pokazywanie tego w pracy doktorskiej jest zbyteczne. Szczególnie, że jest to najprostszy model do analizy kierowania samochodem.
7. Str. 45, rys. 2.8 – rysunek ten jest w istocie powtórzeniem w nieco prostszej wersji rysunku 2.5, a więc jeden z tych rysunków jest zbyteczny.
8. Str. 45, ostatni akapit – styl: „Równania ruchu ... stanowią dwa liniowe równania ruchu ”.
9. Str. 46, ostatni akapit – cytuję: „Model ... przedstawiony w postaci równań różniczkowych nie pozwala na wyciągnięcie istotnych wniosków dotyczących dynamiki ruchu kierowanego pojazdu. Chcąc przeprowadzić taką analizę, celowym jest przekształcenie formy modelu ... z postaci równań różniczkowych do postaci transmitancyjnej, co umożliwia analizę dynamiki ruchu.”. A jednak bardzo wielu autorów posługuje się modelem w postaci równań różniczkowych. Czy to rzeczywiście zdaniem Doktoranta znaczy, że oni nie wyciągają istotnych wniosków ze swoich analiz?
10. Str. 47, Tab, 2.1 – w tabeli tej, zawierającej parametry wykorzystywane do analizy modelu rowerowego w 22 publikacjach, widoczne jest bardzo duże ich zróżnicowanie. Dostrzega to również Doktorant, pisząc (str. 46, linia 11<sub>d</sub>): „... można dostrzec znaczny rozrzut wartości tych parametrów.” i nie komentując w tym miejscu przypuszczalnych przyczyn. Większość tych różnic najprawdopodobniej wynika z faktu, że w poszczególnych publikacjach autorzy podają przykład analizy dla różnych samochodów – wówczas różnice są uzasadnione. Ciekawym byłoby, gdyby Doktorant wskazał przypadki (jeśli takie występują), w których bardzo podobne samochody ze względu np. na masę

i rozstaw osi mają w tabeli 2.1 bardzo różne inne parametry, z trudnych do wyjaśnienia przyczyn. To pozwoliłoby wyeliminować wątpliwe dane literaturowe.

11. Str. 48, linie 6<sub>d</sub> – 4<sub>d</sub> – cytuję: „W praktyce proces zmiany pasa ruchu przebiega w taki sposób, że wartości maksymalne kąta odchylenia pojazdu od osi drogi są rzędu kilku stopni.”. Prawda, ale tylko do pewnych wartości prędkości. Przy większych prędkościach są na pewno większe, a przy jeszcze większych może nastąpić utrata stateczności. W tym miejscu Autor powinien zadeklarować, wspomniany już w uwadze 4 zakres prędkości.
12. Str. 49, linia 4<sup>g</sup> – jest: „... równania (2.6 - 2.8). Chyba chodzi o równania (2.4 - 2.6).
13. Str. 53, linie 5<sub>d</sub> – 4<sub>d</sub> – cytuję: „Analiza ta wyraźnie pokazuje, jak zmieniają się te parametry w przypadku stosowania różnych rekordów danych wynikających z Tab. 2.1 ... „. Zmiana analizowanych parametru byłaby zapewne mniejsza, gdyby Doktorant po analizie danych z tej tabeli wyeliminował dane wątpliwe – patrz uwaga 10.
14. Str. 54, rys. 2.13 – na rysunku widać różnicę współczynnika wzmocnienia aż 8-krotną (już przy prędkości ok. 100 km/godz.). Czy to jest fakt obiektywny, czyli naturalny rozrzut tego współczynnika dla różnych samochodów (osobowych), a może wynika z nie wyeliminowania danych wątpliwych z tabeli 2.1?
15. Str. 55, linia 7<sup>g</sup> oraz rys. 2.14 i 2.15 – cytuję: „W istocie można zredukować właśnie te człony, które ... mówią o pewnej korekcji dynamiki skutkującej występowaniem pewnych stanów przejściowych ...). Mam wątpliwości, czy można zredukować. Już przy prędkości 72 km/godz., na wykresach podanych na przywołanych rysunkach przeregulowanie wynosi 10%. Przy większych prędkościach będzie na pewno większe. To procesy przejściowe (przy dużych prędkościach i gwałtownych manewrach) przyczyniają się w dużej mierze do utraty stateczności.
16. Str. 58, rys. 2.16 – pokazuje wyniki symulacji z uwzględnieniem zmodyfikowanej („rozwinętej”) charakterystyki przełożenia. Tu Doktorant nie podał wartości przeregulowania, ale w dalszym ciągu wynosi ono 10%, jak na rysunku 2.14. Gdzie zatem jest efekt modyfikacji charakterystyki przełożenia?
17. Str. 67, początek rozdziału 2.6.4. – podana jest definicja pojęcia algorytmu – w pracy doktorskiej zbyteczna.
18. Str. 74, linie 2<sub>d</sub> – 1<sub>d</sub> – dociążenie kół przednich nie jest skutkiem „nurkowania”, tylko działania siły bezwładności podczas hamowania.
19. Str. 76, linie 7<sup>g</sup> – 10<sup>g</sup> – cytuję: „Zakładając, że pojazd skręca w lewo podczas zmiany pasa ruchu należy umieścić punkt P bliżej tylnej osi pojazdu.” Skoro tak, to jeśli by skręcał w prawo, to należałoby punkt P przesunąć bliżej osi przedniej? Ponadto w następnym zdaniu napisano, że przesunięto punkt P aż o  $0,5L_B$  – to chyba przesada, po to aby udowodnić znaczny wpływ wiatru bocznego?
20. Str. 96 i 97 – brak w tekście odwołania do Tab. 3.5 i 3.6 oraz do rys. 3.13 – czy zatem są niepotrzebne?
21. Str. 100, linia 9<sup>g</sup> – co to jest „dodawanie w sposób addytywny”? Jeśli takie istnieje, to czy można dodawać w sposób nie addytywny?

22. Str. 102 – rozdz. 4.2 nosi tytuł: „Wstępne badania symulacyjne ...”. Można domniemywać, że po nich nastąpią badania właściwe, czy może końcowe. Czy może należy rozumieć, że tymi właściwymi są badania wrażliwości?
23. Str. 108, rys. 4.6 – w pierwszym wierszu na tym rysunku powtórzono 4-krotnie ten sam wykres.
24. Str. 142, rozdz. 7.1 – zbyt wiele jest tłumaczenie w pracy doktorskiej (czy w innych pracach naukowych), po co są załączniki.
25. Str. 142, rozdz. 7.2 – stosownie do uwagi 6 uważam, że ten załącznik również jest zbyt wiele.
26. Str. 154, Zał. nr 3 – szkoda, że pokazane w tym załączniku (szczególnie w Tab. 7.1) silne zróżnicowanie, poza podaniem wyników w tabeli oraz wykazaniem podziałem na samochody podsterowne i nadsterowne (niektóre silnie) nie znalazło większego odzwierciedlenia w głównym nurcie analiz modelu samochodu, pokazanych w rozdz. 2.
27. Str. 150, Zał. nr 4 – rys. 7.6, rekord (samochód) 13: przeregulowanie 23%, co oznacza odchylenie od środka pasa o 0,5 m, przy  $v = 20\text{m/s}$  (72 km/godz.); rys. 7.7, rekord (samochód) 14: przeregulowanie 18%, co oznacza odchylenie od środka pasa o 0,4 m, przy tej samej prędkości. To dużo – to wzmacnia sugestię o wyeliminowaniu danych wątpliwych – patrz uwagi 10 i 13. Poza tym szkoda, że z myślą o samochodzie autonomicznym nie podano wartości przy większych prędkościach, np. 30 m/s (108 km/godz.).
28. Str. 163, Zał. nr 5 – zawarte tu opisy stosowanej aparatury są zbyt obszerne i szczegółowe. Czym jest głowica Correvit, czy kierownica pomiarowa i inne, w środowiskach techniki samochodowej w instytucjach naukowo-badawczych jest powszechnie znane. Wystarczyło podać nazwę urządzenia, model i podstawowe parametry (Tab. 7.3), a załącznik byłby co najmniej o połowę krótszy.
29. Str. 172, Zał. nr 7 – to 8 stron poświęconych testowaniu procedur numerycznych pakietu Matlab&Simulink. Ponowna uwaga, że jest to zbyt obszerne i szczegółowe. Na przykład w Tab. 7.7, w żadnej kolumnie różnice wyników dla testowanych 8 procedur nie przekraczają 1%, a wiele jest mniejszych od 1%. W pozostałych 11 tabelach też w olbrzymiej większości są bardzo małe.

Poza wymienionymi uchybieniami praca napisana jest bardzo starannie. Wszystkie sformułowania są precyzyjne, stosowana jest poprawna terminologia naukowa i techniczna. W wykazie uwag krytycznych nie wskazano znaczących błędów merytorycznych.

### **Ocena końcowa rozprawy**

Recenzowaną rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny pracy. Uważam, że zadanie jakie podjął Autor w rozprawie zostało w sposób poprawny i obszerny rozwiązane z wykorzystaniem wiedzy teoretycznej z różnych dziedzin inżynierii mechanicznej oraz techniki komputerowej. Autor wykazał, że

dobrze opanował tę wiedzę i potrafi się nią skutecznie posługiwać do rozwiązywania problemów naukowych i technicznych.

Praca mgr inż. Jakuba Faryńskiego posiada cechy poprawnie przeprowadzonej pracy naukowej. Autor wykazał, że potrafi w sposób poprawny prowadzić różnorodne badania i analizy, pozwalające na kompleksową ocenę badanego zjawiska. Praca zrealizowana jest rzetelnie. Jako całość stanowi logiczną i spójną analizę wielu czynników wpływających na poprawność działania opracowanego algorytmu automatycznego sterowania skrętem kół pojazdu z kołami kierowanymi dwóch osi (4WS).

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie bardzo interesującego z teoretycznego punktu widzenia, a zarazem mającego potencjalnie bardzo dużą wartość utylitarną problemu naukowego. Problem ten jest w ostatnich latach tematem bardzo aktualnym i podejmowanym w wielu pracach badawczych i publikacjach naukowych.

**Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Faryńskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą Ustawę z dnia 14 lipca 2018r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późniejszymi zmianami), dlatego wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

