

dr hab. inż. Andrzej Harlecki, prof. UBB
Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
Uniwersytet Bielsko-Bialski

Bielsko-Biała, 26 lutego 2024

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Jakuba Jana Faryńskiego

**pt. „Opracowanie i badania symulacyjne algorytmu sterowania
skrzyżnych kół w samochodzie 4WS”**

1. Dobór tematu i zakres prac

Recenzowana rozprawa doktorska – podzielona na 5 rozdziałów i zawarta na 188 stronach wraz z 84 rysunkami, 39 tabelami, spisem treści, streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem wybranych oznaczeń i wyjaśnieniem przyjętych skrótów, 7 załącznikami oraz obszernym spisem literatury obejmującym 205 pozycji (wśród których były też publikacje internetowe) – dotyczy interesującego zarówno w sensie poznawczym, jak i praktycznym zagadnienia z zakresu analizy dynamiki ruchu samochodów 4WS (ang. Four Wheel Steering), a w szczególności skupia się na opracowaniu algorytmu działania sterownika wspomagającego kierowcę rozważanych samochodów podczas fundamentalnego manewru zmiany pasa ruchu i na przeprowadzeniu stosownych badań symulacyjnych.

2. Charakterystyka treści pracy

Recenzowana rozprawa dotyczy interesującej problematyki sterowania samochodów 4WS. Dzięki czterem kołom skrzyżnym poprawia się trzy parametry wpływające na prowadzenie pojazdu. Przy prędkości manewrowej system pomaga zmniejszyć promień

skreću, a tym samym ułatwia zawracanie czy parkowanie. Koła osi tylnej skręcają się w przeciwnym kierunku niż koła osi przedniej. Przy wartości prędkości mniejszej od pewnej wartości, którą Doktorant oznacza w tab. 1.3 symbolem V_0 , różnej dla różnych marek samochodów, koła tylne skręcają się w przeciwnym kierunku niż koła przednie, co wpływa na zwrotność pojazdu na zakrętach. Przy wartości prędkości V_0 samochodu skręt kół tylnych nie następuje, czyli samochód zachowuje się, jak klasyczny samochód z dwoma kołami skrętnymi (można by go określić symbolem 2WS). Przy wyższych wartościach prędkości od wartości prędkości V_0 system działa odwrotnie – koła tylne skręcają się w tę samą stronę pod niewielkim kątem, co koła przednie. Dzięki temu zyskuje się większą stabilność podczas zmiany pasa ruchu i przy pokonywaniu zakrętów, co powoduje zmniejszenie zjawiska nadsterowności. We wczesnych wersjach samochodów 4WS kierunek skrętu kół tylnych był ściśle uzależniony od kąta skrętu kierownicy. Były to systemy w pełni mechaniczne. Współczesne systemy elektroniczne sprawiają, że kierunek skrętu kół tylnych jest zależny wyłącznie od wartości prędkości samochodu. Podsumowując można stwierdzić, że zastosowanie układów 4WS poprawia nie tylko komfort kierowania przy niskich wartościach prędkości (przy parkowaniu samochodów), co ma pomóc przede wszystkim niedoświadczonym kierowcom, ale także wspomaga stabilizację, a więc bezpieczeństwo jazdy przy dużych wartościach tych prędkości podczas tzw. „jazdy szosowej”.

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawił genezę podjęcia tematu pracy. Rozdział zawiera opis historii powstania samochodów 4WS oraz przegląd literatury dotyczącej tematyki sterowania skrętem kół w samochodzie 4WS, na podstawie którego sformułowane zostały istotne wnioski:

- problematyka sterowania samochodów 4WS jest wielowątkowa (należało zatem wybrać stosowny wątek, który można by było objąć rozprawą doktorską),
- warto podjąć zagadnienie zmiany pasa ruchu, które ma znaczenie podstawowe (wątek ten należy rozważyć przede wszystkim w zakresie fazy wykonawczej, która dotyczy właściwego procesu sterowania; Doktoranta nie interesowała zatem faza przygotowawcza, która dotyczy aspektu psychologicznego); algorytm miał zatem zapewnić sterowanie procesem zmiany pasa ruchu i stabilizację ruchu jako końcowy etap tego procesu,
- wyznaczone algorytmy sterujące muszą być efektywne numerycznie i być realizowane „on-line” (czyli w czasie rzeczywistym), bowiem odnoszą się do „obiektu rzeczywistego działającego w takim czasie”; algorytmy te powinny równocześnie dawać możliwość ich aplikacji przy obecnym poziomie techniki,

- Doktorant zwrócił uwagę, że w przypadku klasycznych samochodów 2WS istnieje dobrze przebadana koncepcja ich sterowania dotycząca fazy wykonawczej manewru zmiany pasa ruchu, wykorzystująca efektywne algorytmy realizowane w czasie rzeczywistym, która bazuje na dwupoziomowym systemie sterowania, gdzie na jednym poziomie generowany jest sygnał referencyjny (typu bang-bang), a na drugim poziomie następuje jego korekta w wyniku działania układu regulacji; Doktorant zauważył, że istniejącą koncepcję dotyczącą sterowania samochodów 2WS można zastosować i nieco rozszerzyć w przypadku samochodów 4WS,
- w rozprawie można wykorzystać często stosowany model rowerowy samochodu 4WS – jednobryłowy i płaski,
- Doktorant zwrócił ponadto uwagę na nieoczekiwanie małe zainteresowanie badaczy zastosowaniem modeli transmitancyjnych w systemie sterowania – ich podstawową zaletą jest to, że pozwalają one na daleko idące redukcje modelu matematycznego, co jest istotne w obliczeniach realizowanych „on line”,
- z uwagi na brak obiektu rzeczywistego w realizacji badań opracowanego algorytmu – niejako w celu pewnego rodzaju „rekompensaty” – należy uwzględnić zaawansowane techniki symulacyjne, które powinny pozwolić także na analizę wrażliwości wyznaczonego algorytmu.

W końcowej części rozdziału została sformułowana koncepcja rozprawy doktorskiej, która zawiera opis celu pracy i jej zakresu, a także metodologii i hipotezy badawczej. Formułując koncepcję pracy, Doktorant stwierdził, że dotyczyć ona będzie klasycznej postaci samochodów 4WS, czyli takiej, w przypadku której skręt kół tylnych wyznaczony jest na podstawie skrętu kół przednich z wykorzystaniem odpowiedniej charakterystyki przełożenia zależnej od wartości prędkości samochodu. Postanowił zatem ściśle uzależnić współpracę kół przednich i tylnych poprzez zależną od prędkości charakterystykę przełożenia (przedziałami liniową) i doprowadzić dzięki temu do postaci dwóch transmitancji – osobno dla procesu tzw. transpozycji i procesu stabilizacji zmiany pasa ruchu. Charakterystyka ta miała zostać przyjęta jako stała i być opracowana przez producenta samochodu. Przygotowany algorytm miał się odnosić do konkretnego autonomicznego samochodu i miał uwzględniać jego parametry techniczne.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił kwestię opracowania modelu matematycznego autonomicznego samochodu 4WS ze sterownikiem zmiany pasa ruchu. Określone zostały trzy fundamentalne elementy tego modelu: model sterownika

(wykorzystujący zredukowany model rowerowy 4WS w wersji transmitancyjnej i rozpatrywany w dwóch wariantach – jako sterownik w pojeździe autonomicznym i jako element wspomagania kierowcy), rozbudowany model pojazdu rzeczywistego zwany modelem wirtualnym (wykorzystujący pełny model rowerowy wyrażający dynamikę poprzeczną samochodu z uwzględnieniem wpływu zjawiska aerodynamiki oraz dynamiki układu kierowniczego z uwzględnieniem luzu i tarcia) i model układu pomiarowego, który dostarcza z obiektu niezbędne sygnały do sterownika (sterownik cyfrowy generuje sygnał sterujący typu „bang-bang”, który następnie jest korygowany na podstawie sygnałów z układu pomiarowego pozyskanych z czujników ruchu w rzeczywistym pojeździe; w badaniach dopuszcza się różne zakłócenia elektryczne występujące w układzie pomiarowym typu szum i przesunięcie sygnału względem zera, czyli offset). W rozdziale tym odniesiono się do istotnego wpływu prędkości samochodu na charakterystyki przełożenia i parametry transmitancyjne. Przedstawione są formuły analityczne opisujące sygnały referencyjne występujące w generatorze sygnałów referencyjnych algorytmu sterowania oraz wyznaczone są analityczne postacie regulatorów. Dzięki regulatorom sygnały sterujące ruchem pojazdu mogą być tak skorygowane, aby trajektoria ruchu rzeczywistego pojazdu była bliska trajektorii referencyjnej odpowiedniej dla zaistniałej sytuacji drogowej. Zaprezentowano również pełną postać algorytmu ze schematem typu „flow-diagram”, który opisuje sterowanie procesem zmiany pasa ruchu. Model rowerowy wyrażony jest poprzez liniowe równania ruchu w układzie lokalnym i uzupełniony jest nieliniowymi równaniami opisującymi przekształcenia zmiennych z układu lokalnego do globalnego. Zdaniem Doktoranta tak wyprowadzony model rowerowy w postaci układu równań różniczkowych nie pozwala na pełną analizę dynamiki ruchu kierowanego pojazdu. Celowe było – jego zdaniem – przekształcenie formy modelu z postaci równań różniczkowych do postaci transmitancyjnej. Postać taka pozwala ponadto na przeprowadzenie dogłębnych redukcji modelu, co jest – jak już podkreślano – istotne w przypadku szybkich obliczeń przeprowadzanych w czasie rzeczywistym. Aby to uczynić, trzeba było przyjąć pewne założenie, że proces zmiany pasa ruchu przebiega w taki sposób, iż wartości maksymalne kąta odchylenia pojazdu są rzędu kilku stopni. Oznacza to, że nieliniowe równania transformacji zmiennych można linearyzować. Po linearyzacji równań model matematyczny ma postać liniową i może być poddany transformacji Laplace’a. Uzyskuje się w ten sposób model w postaci równań operatorowych, a następnie w postaci transmitancji.

Rozdział trzeci poświęcony jest problematyce identyfikacji parametrów modelu rowerowego. We wprowadzeniu do rozdziału opisane są kwestie identyfikacji „online” na

potrzeby działania algorytmu w pojeździe oraz identyfikacji „offline” na potrzeby przeprowadzania symulacji na rozbudowanym modelu samochodu 4WS. Identyfikacja „online”, dotycząca fazy wstępnej, miała pozwolić na określenie w czasie jazdy wartości parametrów niezbędnych do funkcjonowania sterownika. Zadaniem identyfikacji „offline” miało być wyznaczenie danych, które są potrzebne do badania sterownika metodami symulacji komputerowej. W ramach identyfikacji „offline” dokonano także identyfikacji współczynników odporności na znoszenie, wykorzystując specjalny tor przeznaczony do tego celu.

Rozdział czwarty poświęcony jest prezentacji badań symulacyjnych wykonanych w ramach pracy doktorskiej. Jak już stwierdzono, symulacje miały umożliwić przetestowanie proponowanej metody bez konieczności posiadania rzeczywistego obiektu.

Rozdział piąty stanowi podsumowanie rozprawy – przedstawiono w nim wnioski końcowe i propozycje badań, które mogłyby być przeprowadzone w przyszłości.

3. Szczególne osiągnięcia Doktoranta

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta można zaliczyć:

1. wyprowadzenie równań ruchu modelu rowerowego samochodu od podstaw (jak stwierdził Doktorant, nie jest to powszechne postępowanie) – dla lokalnego i globalnego układu współrzędnych,
2. wyprowadzenie transmitancji (jest to jedna z najbardziej istotnych, a więc kluczowych, części rozprawy) – forma transmitancyjna ułatwiła syntezę algorytmu sterownika, który składa się w głównej mierze z generatora sygnałów referencyjnych oraz regulatorów opracowanych na bazie techniki LQR (ang. Linear-Quadratic Regulator), czyli regulatorów liniowo-kwadratowych,
3. przeprowadzenie szerokiego zakresu badań symulacyjnych służących analizie wrażliwości, czyli badaniu wpływu poszczególnych parametrów modelu zastosowanego w sterowniku na efekty sterowania z uwagi na jego rozmaite niedoskonałości i wynikające z tego możliwe zaburzenia występujące w układzie sterowania; w związku z tym Doktorat opracował model wirtualny samochodu 4WS (fakt ten można uznać za jego kolejne istotne osiągnięcie) – w strukturze modelu uwzględniono układ kierowniczy z luzem i tarciami oraz układ jezdny z uwzględnieniem możliwości oddziaływania wiatru bocznego,

4. przeprowadzenie szerokiego zakresu badań doświadczalnych samochodu osobowego w laboratorium i na placu manewrowym Politechniki Krakowskiej.

Osiągnięcia te nie byłyby możliwe bez zasługującego na podkreślenie bardzo dobrego przygotowania merytorycznego Doktoranta i opanowania przez niego trudnych zagadnień matematycznych.

Do osiągnięć Doktoranta trzeba zaliczyć także jego bardzo dobre rozeznanie w zakresie analizy dynamiki i sterowania samochodów 4WS, czego dowodem jest dokonanie obszernego i krytycznego przeglądu literatury, opatrzonego fachowymi komentarzami i stanowiącego podwaliny do dalszych merytorycznych rozważań.

4. Uwagi krytyczne

Zasadnicza uwaga

Z przyczyn obiektywnych, a więc niezależnych od Doktoranta, opracowany algorytm nie mógł zostać zastosowany w praktyce – dlatego, że nie dysponował on po prostu rzeczywistym obiektem w postaci samochodu 4WS. Z tego faktu wynika, że wszelkie próby zbadania jego działania w praktyce niejako z założenia były skazane na niepowodzenie. Powstaje pytanie, jak Doktorant widzi tę sytuację w najbliższej przyszłości? Czy jakkolwiek próba wykorzystania algorytmu – chociaż w ograniczonym zakresie – jest zupełnie nierealna? Czy prace w tym zakresie będą kontynuowane? Bezspornie miałyby one duże znaczenie aplikacyjne, bowiem opracowany algorytm bazuje na oryginalnym i zawansowanym podejściu używanym przez badaczy, skupionych wokół Profesora Żardeckiego, wykorzystującym zastosowanie transmitancji. Warto byłoby ten algorytm rozpropagować w środowisku innych, przede wszystkim zagranicznych badaczy. W tym sensie recenzowana praca doktorska zawierająca solidny materiał teoretyczny, poparty badaniami doświadczalnymi, stanowiłaby poważny materiał merytoryczny w tym zakresie. Oczekuję na komentarz Doktoranta w tej sprawie.

Uwagi o mniejszym znaczeniu

1. Geneza pracy – w mojej opinii – jest słabo uargumentowana,
2. Doktorant zauważył, że istnieje małe zainteresowanie innych autorów zastosowaniem transmitancji w zagadnieniach modelowania zagadnień dynamiki, chociaż pozwalają one „głębiej” (co to znaczy ?) przeanalizować strukturę modelu i dokonać jego redukcji. Pozostaje

pytanie, dlaczego tak się dzieje. Czyżby inni (w tym zagraniczni) autorzy nie wiedzieli o tym? Może Doktorant spróbuje to skomentować,

3. Sposób wyznaczenia współczynników odporności na znoszenie K_A i K_B w procesie tzw. „strojenia”, aby uzyskać jak najbardziej zbliżone przebiegi odpowiedzi rzeczywistych i symulacyjnych, w mojej opinii jest poprawny. Czy taki sposób jest zgodny z zaleceniami przedstawionymi w przytoczonej monografii [108], zresztą nieprecyzyjnie zacytowanej, do której wcześniej Doktorant odsyła czytelnika? Niestety nie zdążyłem się z nią jeszcze zapoznać (jest trudno dostępna). Zapis w tekście doktoratu nie jest dosyć jasny i być może „czegoś” tu nie zrozumiałem,

4. Jak Doktorant rozumie pojęcie środka nacisku (P), w którym działa siła boczna wiatru i jak wyznaczyć jego pozycję (str. 76)?

5. Doktorant stwierdził, że model rowerowy przedstawiony w postaci równań różniczkowych nie pozwala na wyciągnięcie istotnych wniosków dotyczących dynamiki ruchu kierowanego pojazdu (str. 46) – właściwie dlaczego? Proszę Doktoranta o komentarz w tej sprawie. Zaznaczam, że dobrze rozumiem zalety rachunku transmitancyjnego,

6. Nawiązując do stwierdzeń na str. 48, można zadać pytanie: „Gdyby maksymalne wartości kąta odchylenia pojazdu od osi drogi w procesie zmiany ruchu były większe niż kilka stopni (np. w sytuacji awaryjnej), czy proponowany algorytm byłby w stanie poprawnie zadziałać?” Oznaczałoby to, że w takiej sytuacji nieliniowe równania transformacji zmiennych nie powinny być linearyzowane, a więc zaburzyłoby to istotę algorytmu. Rozumiem też, że ostateczną odpowiedź na to pytanie mogłyby dać jedynie eksperymenty doświadczalne,

7. Nie rozumiem, jak uzyskano zależności (2.26) - (2.29) na str. 51. Proszę Doktoranta o komentarz,

8. Na str. 58 Doktorant stwierdza, że stosowana będzie charakterystyka $P_{AB}(V)_2$, ponieważ stanowi ona „bardziej nowoczesne” podejście stosowane przez czołowe firmy. W jakim sensie? Proszę Doktoranta o komentarz,

9. Doktorant uwzględnił działanie wiatru bocznego różnicujące model wirtualny od modelu referencyjnego. Opiera się przy tym na interesującej krajowej publikacji [155], przyjmując za nią wartości bezwymiarowych współczynników siły bocznej i momentu odchylenia, uzależniając je od kąta znoszenia pojazdu β (2.121) – (2.122). Szkoda, że Doktorant nie zacytował artykułu, stanowiącego pierwotne źródło informacji o tych współczynnikach (wynika to zresztą jasno z treści publikacji [155], w której autor powołuje się na ten artykuł).

10. Szkoda także, że Doktorant nie dysponował stanowiskiem badawczym do wyznaczenia momentu bezwładności badanego samochodu. Zmusiło go to do pracochłonnego szacunkowego wyznaczania jego wartości (wiemy, że względem pionowej osi – ale jak ona jest ulokowana?). Czy uzyskany z trudem wynik (3.12) jest dostatecznie realny? Czy Doktorant próbował to sprawdzić?

11. Określenie „trajektoria ruchu pojazdu” używane wielokrotnie w rozprawie wydaje się mojej opinii nieco enigmatyczne. Czy Doktorant nie powinien się tego jakoś sprecyzować?

12. Jak była wyznaczona transmitancja określona wzorem (2.133)? – nie widzę tego wprowadzenia w Załączniku nr 2,

13. Sposób wyznaczenia współczynników K_A , K_B odporności na znoszenie poprzez tzw. „strojenie”, aby uzyskać jak najbardziej zbliżone przebiegi odpowiedzi rzeczywistych i symulacyjnych, w mojej opinii jest poprawny. Czy taki sposób jest zgodny z zaleceniami przedstawionymi w przytoczonej monografii [108]? Niestety nie zdołałem się z nią jeszcze zapoznać, bo jest trudno dostępna.

14. Doktorant nie ustrzegł się też pewnej liczby błędów związanych z edycją pracy (były to przede wszystkim niestylistyczne sformułowania i dość liczne błędy interpunkcyjne). Czasem Doktorant ucieka się do określeń beletrystycznych, pisząc „algorytm jest w stanie sobie poradzić” (str.6) – to przecież nie jest człowiek. Nie ustrzegł się też dwóch małych błędów ortograficznych (str. 78, gdzie stosuje zapis „jedno masowy” zamiast „jednomasowy”; str. 117, gdzie stosuje zapis „Nie mniej” zamiast „Niemniej”). Czasem stosuje równoważnik zdania zamiast zdania, pisząc „Zarówno w układach otwartych, jak i zamkniętych” (str. 28). Doktorant mnoży określenia dotyczące tego samego pojęcia – rozumiem jego dobre intencje, lecz utrudnia to czytanie pracy, szczególnie gdy jest to jej pierwsza lektura. Prawdopodobnie błędnie zaznaczył odniesienia do rys. 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 3.5, 3.7 i 4.3 i brakuje odniesień do rys. 2.20, 3.3, 3.11, 3.13 i 4.6; ponadto nie odniósł się do tab. 3.6 i błędnie odniósł się do tab. 3.1 i 4.3 (zamieszczony wykaz usterek świadczy o tym, że Doktorant przeprowadził niedostatecznie dokładną korektę treści pracy w tym zakresie). Doktorant świadomie stosuje odniesienia do niektórych równań, a do innych nie – jest to w mojej opinii specyficzne podejście.

Zauważone usterki nie mają one jednak znaczenia merytorycznego i nie wpłyną na ogólną pozytywną ocenę pracy.

5. Wnioski końcowe

Podsumowując przedstawione rozważania, stwierdzam, że wyszczególnione uwagi krytyczne zasadniczo mają wyłącznie charakter dyskusyjny i nie obniżają w żaden sposób wartości merytorycznej recenzowanej rozprawy, a zatem nie wpłyną na jej końcową ocenę. Oferowana w rozprawie metoda badawcza algorytmu sterowania skrętem kół w samochodzie 4WS może być zatem uznana za merytorycznie poprawną. Przegląd literaturowy jest szczegółowy i uwzględnia najważniejsze publikacje z zakresu obszaru tematycznego pracy. Ważne znaczenie dla pracy ma również jej część badawcza, która stanowi istotną część rozprawy.

Zarówno dobór tematu, jak i zakres pracy oceniam pozytywnie. Stwierdzam, że cel postawiony na wstępie pracy został osiągnięty, a Doktorant wykazał się umiejętnością prowadzenia zarówno teoretycznej, jak i praktycznej analizy wybranego zagadnienia z zakresu szeroko pojętej dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”.

Wobec tego wyrażam przekonanie, że przedłożona mi do recenzji praca doktorska zatytułowana „Opracowanie i badania symulacyjne algorytmu sterowania skrętem kół w samochodzie 4WS”, której autorem jest mgr inż. Jakub Jan Faryński, spełnia wymogi Ustawy dotyczącej stopni i tytułu naukowego. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie Doktoranta do obrony przygotowanej przez niego rozprawy doktorskiej.

Przedstawiona recenzja została opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie na posiedzeniu w dnia 20 grudnia 2023 roku (zgodnie z uchwałą nr 98/RDN IM/2023).

Martwicki