

Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Pawelski
Politechnika Łódzka
Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Weigel-Milleret
pt. „Wpływ regulacji sił napędowych na stabilność ruchu wąskich pojazdów czterokołowych”

Opinię opracowano w odpowiedzi na prośbę Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, prof. dra hab. inż. Jerzego Śladka, wyrażoną w piśmie z dnia 20.11.2019 r. Podstawą opracowania opinii jest praca doktorska przesłana wraz ze zleceniem.

Tematykę pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Weigel-Milleret uważam za ważną ze względów naukowych, bowiem praca ta dotyczy zagadnienia: oceny stabilności pojazdu o wąskim rozstawie kół w ruchu miejskim i propozycji systemu aktywnego ograniczania przechyłu bocznego w oparciu o sterowanie siłami wzdłużnymi (napędu bądź hamowania) na styku kół z nawierzchnią. Pojazd o wąskim rozstawie kół charakteryzuje się znacznie gorszym statycznym współczynnikiem stabilności w porównaniu z samochodem klasycznym a tym samym cechuje go znacznie mniejsza odporność na siły boczne. Jednoczesne spełnienie wielu kryteriów pojazdów czterokołowych jest w tym przypadku jeszcze bardziej utrudnione. Wykorzystanie zalet napędu elektrycznego, proekologicznego i upraszczającego układ napędowy do montażu silnika bezpośrednio w kołach pojazdu, pozwoliło na zaproponowanie innego rozstawu kół osi tylnej i przedniej oraz zamontowanie specjalnego sprzęgu. Uzyskano tym sposobem pojazd z możliwością poruszania się i postoju w układzie tandem. Przedstawiona koncepcja pojazdu świadczy o dużej dojrzałości konstrukcyjnej, konkurencyjnej do rozwiązań proponowanych przez koncerny samochodowe. Propozycja korygowania stabilności pojazdu przez płynne sterowanie wielkością siły wzdłużnej w zależności od wartości siły poprzecznej i warunków przyczepności pod kołem, to kolejna pozytywna ocena analizowanego w pracy doktorskiej prototypu, w mojej ocenie gotowego do wdrożenia przemysłowego. Zastosowane silniki elektryczne BLDC występujące handlowo w kołach elektrycznych rowerów bądź motocykli, świadczą również o uwzględnianiu kosztów w budowie prototypów: pojazdu i aktywnego układu stabilności.

Możliwość praktycznego wykorzystania wyników stanowi wartość dodaną pracy a ich potwierdzenie przez budowę prototypu i zweryfikowane doświadczalnie parametry układu sterowania, to dodatkowe wymierne efekty naukowe i dydaktyczne.

Recenzowane w pracy zagadnienia dotyczą układu mechatronicznego, złożonego z podzespołów: mechanicznych, elektrycznych oraz sterowania. Wynika stąd ich złożoność.

Cel i teza pracy zostały sformułowane przez Autora w rozdziale trzecim i czwartym.

Celem było opracowanie aktywnego systemu zapobiegającego przewracaniu wąskiego pojazdu czterokołowego przez kontrolowane zróżnicowanie sił napędowych.

Tezę pracy można zredukować do opracowania wytycznych zweryfikowanych doświadczalnie, dotyczących optymalizacji układu sterowania elektrycznymi silnikami napędowymi w kołach pojazdu, by zwiększyć jego stabilność ruchu.

Zakres pracy doktorskiej obejmuje:

- Omówienie stanu wiedzy na temat wąskich pojazdów miejskich zamieszczono w rozdziale 2, od strony 8 do 14. Przegląd istniejących konstrukcji, najczęściej prototypowych, wskazuje na trudności pogodzenia w takich pojazdach wielu parametrów a w szczególności: łatwej dostępności do wnętrza i dobrej widoczności z odpornością na siłę odśrodkową podczas jazdy na łuku, zwłaszcza gdy stosunek wysokości środka masy do

rozstaw kół jest wysoki. Pomimo tego Doktorant podtrzymuje tezę i słusznie, o konieczności dominacji małych pojazdów elektrycznych w ruchu wielkomiejskim ze względów środowiskowych. Przyszłościowym rozwiązaniem zaproponowanym w pracy doktorskiej, może być zastosowanie silników elektrycznych w kołach, które nie tylko upraszcza układ napędowy, ale pozwala również na płynny rozdział momentów obrotowych nawet do przeciwnych zwrotów, dzięki czemu można uzyskać moment odchylający tor ruchu większy niż w tradycyjnych układach mechanicznych. Sterowanie silnikami elektrycznymi może być przy tym bardzo dokładne i z niewielką zwłoką, dzięki czemu różnicowanie momentu napędowego może odpowiadać aktualnym warunkom drogowym pod każdym kołem. Taka koncepcja napędu pozwala przenieść zagadnienie przewracania pojazdu na poziom algorytmu sterującego silnikami, w którym od stopnia uproszczenia zjawisk w układach: napędowym, kierowania i zawieszenia zależy m.in. zakres stosowalności systemu stabilności ruchu pojazdu. Różnicowanie momentu napędowego pozwoliło dynamicznie zmieniać charakterystyki sterowności, poprawiając tym samym kierowność i zwiększając stabilność ruchu.

- Istotnym założeniem prototypowej konstrukcji pojazdu zbudowanego w Zakładzie Budowy i Eksploatacji Pojazdów Samochodowych Politechniki Krakowskiej była możliwość łączenia pojazdów w tandem. Stąd rozstaw kół osi przedniej umożliwia wjazd między koła osi tylnej. Wybór silników elektrycznych BLDC i ich montaż w piastach kół tylnych pozwala na realizację takiej koncepcji pojazdu. Dobrą widoczność we wszystkich kierunkach umożliwiły duże szyby i przestrzenna konstrukcja ramy nadwozia, do której zamocowano wszystkie podzespoły podwoziowe. W badaniach drogowych zamontowano tu aparaturę do rejestracji i akwizycji pomiarów uzyskując obiekt autonomiczny.

Przed przystąpieniem do badań drogowych i symulacyjnych przeprowadzono następujące pomiary:

- Geometrii pojazdu a za pośrednictwem wag najazdowych wyznaczono naciski na koła oraz położenie środka masy.
- Momentu bezwładności pojazdu wokół osi pionowej za pomocą platformy zawieszanej na trzech linkach.
- Momentu bezwładności pojazdu wokół osi przewracania na stanowisku z poziomym wahadłem kątowym.
- Za miarę sterowności przyjęto gradient kąta obrotu kierownicy względem przyspieszenia poprzecznego, unormowany przełożeniem układu kierowniczego, zdefiniowany w rozdziale 7.1. Charakterystykę tę określono na podstawie badań drogowych:
 - pojazdu poruszającego się ze stałym kątem obrotu kierownicy i różnymi prędkościami,
 - pojazdu poruszającego się po okręgu o stałym promieniu i różnymi prędkościami.

Badania prowadzono przy różnym rozdziale sił napędowych a mianowicie:

- z siłą napędową rozwijaną tylko pod kołem wewnętrznym na łuku,
- z siłą napędową rozwijaną tylko pod kołem zewnętrznym na łuku,
- z równym rozdziałem sił napędowych pomiędzy kołami.

Próby ze stałym kątem obrotu kierownicy omówiono w podrozdziale 7.4.2. Stwierdzono znaczny wpływ rozdziału sił napędowych na charakterystyki sterowności. W przypadku siły napędowej tylko pod kołem wewnętrznym otrzymuje się największą podsterowność, dla równego rozkładu pojazd zbliżony do neutralnego a dla siły napędowej pod kołem zewnętrznym pojazd nadsterowny.

W badaniach jazdy po torze o stałym promieniu stwierdzono wpływ rozdziału sił napędowych na układ kierowniczy. W przypadku siły napędowej tylko pod kołem wewnętrznym kąt obrotu koła kierownicy rośnie ze wzrostem przyspieszenia poprzecznego, dla równego rozkładu kąt praktycznie nie zmienia się a dla siły napędowej pod kołem zewnętrznym kąt maleje.

Zachowanie się pojazdu od podsterowności do nadsterowności potwierdziło możliwość zbudowania systemu ograniczenia przechyłu w oparciu o rozdział sił napędowych.

- Jako wzorcowy manewr, podczas którego występuje przechył, Doktorant przyjął pojedynczą zmianę pasa ruchu. Manewr ten najczęściej występuje jako obrona przed uderzeniem w przeszkodę. Do symulacji tego manewru należało przyjąć modele: oporów ruchu pojazdu, współpracy koła z nawierzchnią, układu kierowniczego oraz zawieszenia.
- Z pomiarów: prędkości jazdy i kąta obrotu kierownicy wyznaczono funkcję graniczną, której przekroczenie prowadzi do utraty stabilności przechyłowej, tj. oderwania jednego z kół od nawierzchni. Funkcję tą, rys.79, określono metodą symulacji, wykorzystując model o trzech stopniach swobody, obejmujący: odchyłanie, przechył i przemieszczenie boczne pojazdu, z uwzględnieniem sztywności i tłumienia w zawieszeniu. Maksymalny bezpieczny kąt przechyłu nadwozia określono na $\varphi=0.25\text{rad}\approx 14^\circ$. Obliczenia teoretyczne zweryfikowano doświadczalnie uzyskując zgodność określoną współczynnikiem korelacji powyżej 0.93. Zatem, zaproponowany model mógł być podstawą dla algorytmu sterowania w aktywnym systemie ograniczenia przechyłu.

- Dochodzenie do modelu jako podstawy algorytmu sterowania prowadzono w kilku etapach, za każdy razem weryfikując doświadczalnie parametry zredukowane, na początku dla modelu płaskiego tzw. rowerowego, by następnie przejść do modelu dwuśladowego, o trzech stopniach swobody.

Ostatecznie aktywny system zapobiegający przewracaniu pojazdu oparto o model pozwalający przewidzieć tor ruchu w określonych warunkach i odpowiednio zmieniać charakterystykę stabilności przez zmianę sił na styku kół z nawierzchnią. Jako wstępne wartości wprowadzane do modelu przyjęto: kąt obrotu koła kierownicy, prędkość jazdy oraz położenie „manetki przyspieszenia”. Schemat blokowy sterownika przedstawiono na rys.78. W zakresie bezpiecznym sterownik pełni funkcję elektronicznego mechanizmu różnicowego. Napęd przekazywany jest proporcjonalnie do drogi pokonywanej przez dane koło, przez co charakterystyka pojazdu zbliża się do neutralnej i tym samym reakcja pojazdu na ruch kierownicy staje się szybsza.

Po przekroczeniu funkcji granicznej sterownik odwraca znak rozkładu momentów napędowych na doświadczalnie dobrany i pojazd zmienia charakterystykę na silnie podsterowną. Ponadto sterownik stale monitorując kąt przechyłu, po przekroczeniu wartości maksymalnej odcinał zasilanie obydwu silników napędowych, ograniczając tym samym prędkość pojazdu.

Przewidziano następujące stany pracy:

1. Jazda na wprost z małą prędkością lub postój, uwzględniające zakres martwy $\pm 0.02\text{rad}\approx \pm 1^\circ$ kąta obrotu kierownicy
 2. Jazda po torze krzywoliniowym niezagrożona przewróceniem
 3. Jazda po torze krzywoliniowym zagrożona przewróceniem
 4. Kąt przechyłu nadwozia przekracza granicę bezpieczeństwa
 5. Jazda na wprost z maksymalną prędkością
- Wyniki z badań drogowych i symulacyjnych pojazdu z aktywnym systemem przechyłu poprzecznego zamieszczono w rozdziale 12. Badania dotyczyły:
 - skrętu koła kierownicy jako funkcji zbliżonej do skokowej $1(t)$,
 - pojedynczej zmiany pasa ruchu.
 Oceniano maksymalne wartości kąta przechyłu bocznego oraz uzyskane jego zmniejszenie w stosunku do innych sposobów sterowania silnikami elektrycznymi. Działanie systemu zwiększyło podsterowność pojazdu a zaproponowany system zmniejszył niebezpieczeństwo przewrócenia się pojazdu. Badany pojazd z systemem osiągnął zmniejszenie kąta przechyłu o 31%, w porównaniu do pojazdów bez systemu.
 - Wnioski końcowe jako podsumowanie uzyskanych wyników nie budzą moich wątpliwości.

Zakres pracy, przedstawiony w skrócie powyżej, spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Jest niejako instrukcją niezbędnych procedur, jakie należy wykonać przy podobnych

opracowaniach. Uzyskane wyniki są odwzorowaniem obszernej pracy, w której nie proponowałbym żadnych uproszczeń a świadczą pozytywnie o przyjętym planie badań.

Popieram zaproponowaną kontynuację własnego rozwoju naukowego, którą Doktorant wyznaczył w oparciu o ocenę uzyskanych wyników.

Układ treści i opracowanie redakcyjne w swojej edytorskiej wymowie nie budzą zastrzeżeń. Praca liczy 136 stron, 99 rysunków (wykresów), 4 tabele i 81 pozycji literatury. W znaczącej większości to opracowania autorskie. Omówienie wyników w bezpośredniej bliskości rysunków bądź tabel, znacznie ułatwiło ich śledzenie. Należy podkreślić przy tym zwartość podsumowań autora na każdym etapie pracy. Świadczy to pozytywnie o Doktorancie i Szkole profesora Grzegorza a tzw. „literówki” wymieniam poniżej:

- Str.9 „Oczekuje się, że wąski jedno- lub dwumiejscowy pojazd.....będzie rozwiązaniem problemu z dojazdowymi pojazdami.”, Proponuję „Oczekuje się, że wąski jedno- lub dwumiejscowy pojazd..... może być jednym z wariantów pojazdów miejskich”.
- Str.9 „...może być przyczyną niestabilnego jego zachowania podczas pokonywania zakrętów”. Proponuję „...może być przyczyną niestabilnego zachowania....”
- Str.10 „Powszechnie wiadomo, że prawdopodobieństwo przewrócenia wzrasta gwałtownie wraz ze wzrostem stosunku.....”, może „Wiadomo, że prawdopodobieństwo przewrócenia wzrasta ze wzrostem stosunku...”
- Str.23 wzór 22 jest niekompletny, brak masy.
- Str.25 „...będą funkcjami zależącymi...” może „...zależnymi...”
- Str.26 We wzorze 32 i na rys.13 są inne oznaczenia
- Str.29 „W przypadku pojazdów samochodowych, a nie motocykli, zastosowanie biernego systemu przechyłu (passive tilt control) nie jest możliwe ze względu na parametry bezwładnościowe pojazdów.” – stwierdzenie nieprawdziwe
- Str.38 W posumowaniu użyto niewłaściwych sformułowań „...jest bardzo trudnym problemem w przypadku.”, „Zastosowanie przechyłu pojazdu...”, może „... jest złożonym zagadnieniem w przypadku...”, „Zastosowanie systemu kontroli przechyłu pojazdu...”
- Str.54 jest „...w punkcie pracy. możliwe było...”
- Str.71 i 72 W podpisach rysunków 48, 49 i 50 jest „Kąt obrotu...”, powinno być „Kąt ...”
- Str.72 jest „- wynik pomiar”
- W rozdziale 10 stosuje się określenie „przepustnica” pomimo zaproponowanej na str.95 moim zdaniem lepszego określenia „manetki przyspieszenia”. Przepustnica kojarzy się z silnikiem spalinowym.
- Str.104 jest „...maszynami synchronicznymi elektroniczny komutator samoczynnie...”
- Str.114 jest „Przykładowe wyniki testów i symulacji...”
- Str.116 jest „Obliczone wartości kąta przechyłu charakteryzując się zbliżonym kształtem przebiegu, różnice występując w wartościach amplitud.” Może „Obliczone wartości kąta przechyłu charakteryzują się zbliżonym kształtem przebiegu a różnice występują w wartościach amplitud.”
- Str.116 jest „System ten przez proporcjonalny do zamiarów kierowcy rozdział sił napędowych ...”, może „System ten przez proporcjonalny do zamiarów kierowcy rozdział sił napędowych...”

Jak wynika z powyższego wymienione „literówki” nie mają wpływu na wartość merytoryczną pracy, którą oceniam bardzo wysoko.

Dorobek użytkowy pracy dotyczy prototypu czterokołowego, wąskiego pojazdu miejskiego, z aktywnym systemem kontroli przechyłu poprzecznego oraz zastosowanej aparatury, która pozwala na prowadzenie badań z wysoką dokładnością. Należy tu zauważyć:

- Innowacyjną koncepcję pojazdu pozwalającą znacząco ograniczyć jego gabaryty oraz możliwość łączenia w tandem zarówno podczas ruchu jak i podczas parkowania.
- Niskie koszty wykonania pojazdu łącznie z układem sterowania silnikami elektrycznymi.
- Niskokosztową koncepcję sterownika aktywnego systemu przechyłu bocznego

- Łatwą instalację sterownika aktywnego systemu w istniejących już pojazdach z napędem elektrycznym
- Rozwojową koncepcję sterownika. Zastosowanie mikroprocesora o większych możliwościach obliczeniowych powinno umożliwić przeprowadzanie obliczeń ruchu pojazdu i jego korektę w czasie rzeczywistym, odpowiednio do chwilowych warunków przyczepności.
- Zgromadzoną aparaturę użytą w badaniach drogowych i stanowiskowych, tj.
 - potencjometryczny czujnik zadawania prędkości jazdy (położenie „manetki przyspieszenia”)
 - czujnik obrotu koła kierownicy firmy Honeywell RTY270HVNAX
 - 6-osiowy przyrząd firmy Motion Tracking MPU-6050 do pomiaru przyspieszenia poprzecznego, wzdluznego i pochylenia nadwozia pojazdu
 - Transoptor szczelinowy do pomiaru prędkości jazdy
 - płyta Arduino Mega 2560 z oprogramowaniem do rejestracji i archiwizacji pomiarów oraz obsługi sterownika silników napędowych
 - elektroniczna przetwornica napięcia DC/DC
 - głowica pomiarowa Datron Correvit
 - głowica pomiarowa Crossbow
 - układ pomiarowy Racelogic V-box do pomiaru położenia pojazdu w oparciu o nawigację satelitarną (GPS i GLONASS)
 - czujnik przyspieszeń HBM 12/200 z kartą pomiarową i oprogramowaniem Catman
 - wagi pojazdowe WWSB3T o nośności 3000kg z działką elementarną 0.2kg
 - silniki elektryczne BLDC o mocy 3.5 kW z inwentorami
 - akumulatory litowo-jonowe
- Opracowane procedury i metodykę badań, można stosować praktycznie w dowolnym układzie napędowym, co świadczy o przemyślanej i uporządkowanej wiedzy w tym zakresie.

Stopień rozwiązania zagadnień zrealizowano w pełni. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w rozprawie doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Weigel-Milleret zaobserwować można bardzo dobre przygotowanie do prowadzenia równoległe, badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

Umiejętność budowy modeli matematycznych za pośrednictwem m.in. programu Matlab oraz ich weryfikacja eksperymentalna z wykorzystaniem różnych programów, wynikających z zastosowanej aparatury do rejestracji, archiwizowania i opracowywania wyników badań, to narzędzia pracy inżynierskiej opanowane przez Doktoranta.

Fragmety pracy doktorskiej opublikowano w materiałach konferencji międzynarodowych: w Materials Science and Engineering w 2016 i 2018 oraz w Automotive Safety w 2018 roku.

Przechodząc do ogólnej oceny pracy stwierdzam, że praca mgr inż. Krzysztofa Weigel-Milleret reprezentuje dyscyplinę „Budowa i eksploatacja maszyn” (wg nowej klasyfikacji „Inżynierii mechanicznej”) i obejmuje pełny zakres: od analizy teoretycznej, poprzez badania symulacyjne, weryfikację doświadczalną, podsumowania i określenie kierunków dalszych prac. Zbudowane prototypy: pojazdu oraz aktywnego systemu ograniczenia przechyłu i opracowane modele, posiadają potencjał przekraczający potrzeby tego doktoratu. Stanowią dobrą podstawę do ich kontynuacji.

Uwzględniając powyższe proponuję pracę wyróżnić.

Reasumując, wyrażam opinię, że dysertacja mgr inż. Krzysztofa Weigel-Milleret spełnia wymagania, jakie stawia obowiązująca Ustawa o pracach doktorskich (*Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz niektórych innych ustaw*) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

