

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

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Kacpra Spadło
pt. „Analiza poślizgu kołowych platform wysokiej mobilności z hydrostatycznymi układami napędu jazdy”

Opinię opracowano w odpowiedzi na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej, prof. dra hab. inż. Jerzego Małachowskiego, wyrażoną w piśmie z dnia 22.02.2022 r. Podstawą opracowania opinii jest praca doktorska przesłana wraz ze zleceniem.

Tematykę pracy doktorskiej mgr inż. Kacpra Spadło uważam za ważną ze względów naukowych, bowiem podjęto się w niej budowy prototypu platformy oraz modyfikacji hydrostatycznego układu napędowego przez sterowanie dodatkowym momentem obrotowym pochodzącego od układu hamulcowego, przez co zwiększa się zdolność pokonywania przeszkód terenowych. Możliwość praktycznego wykorzystania pomysłu stanowi wartość dodaną pracy doktorskiej a jego potwierdzenie przez budowę obiektu rzeczywistego, badania symulacyjne i stanowiskowe, to wymierne efekty naukowe, dydaktyczne i użytkowe.

Recenzowany w pracy projekt jest przykładem układu mechatronicznego, będącego rezultatem integracji urządzeń mechanicznych, hydraulicznych, technik komputerowych i sterowania.

W początkowej części pracy, tj. do str.28, zamieszczono analizę dostępnych „układów antypoślizgowych” pod kątem ich przydatności do napędu kołowych platform wysokiej mobilności. Omówione rozwiązania to:

- Klasyczne mechanizmy różnicowe stosowane w samochodach.
- Blokady mechanizmów różnicowych włączane czasowo na czas przejazdu po podłożu o niskim współczynniku przyczepności.
W mojej ocenie brak tu prac prof. J. Dzidy z zakresu mechanizmów rozdziału mocy, zastosowanych w prototypach wykonanych przy współpracy z fabrykami i ośrodkami badawczymi przemysłu motoryzacyjnego m.in. w samochodach Tarpan Honker 4x4 i FIAT Panda 4x4. Wprawdzie nie ma to wpływu na wybór obiektu badań, jednak stanowi kilkudziesięcioletni dorobek polskiej myśli naukowo-technicznej.
- Elektroniczne układy kontroli poślizgu np. ASR, TSC, ATC (Volvo) itp.
- Układy stosowane w ciągnikach rolniczych.
- Układy asystencyjne np. firmy MAN.
- Z uwagi na to, że w bezzałogowych platformach lądowych stosuje się napęd na wszystkie koła na drodze hydrostatycznej w konfiguracji szeregowej bądź równoległej, kontrolę poślizgu kół realizuje się przez zastosowanie elementów ograniczających lub kontrolujących przepływ cieczy roboczej.
Alternatywnym rozwiązaniem może być tu również hamowanie silników hydrostatycznych w kołach przez zewnętrzny układ hamulcowy. Taką koncepcję kontroli poślizgu na styku koła z podłożem, Doktorant zaproponował jako temat swoich badań.

Cel i teza pracy zostały sformułowane w rozdziale czwartym, i tak:

Celem pracy było:

„Opracowanie modelu układu antypoślizgowego oraz zbadanie jego wpływu na mobilność Lekkich Kołowych Bezzałogowych Platform Lądowych wysokiej mobilności z hydrostatycznym układem napędowym jazdy”.

Teza pracy w zasadzie ogranicza się do stwierdzenia, że uzupełnienie hydrostatycznego napędu platformy o układ hamulcowy, w którym można regulować chwilę jego aktywacji oraz wartość momentu hamującego na każdym kole, może zwiększyć zdolność pokonywania przeszkód przez platformę. Tak postawiona teza wskazuje także na użytkowy charakter pracy.

Zakres pracy doktorskiej obejmuje:

- Określenie poziomu niezgodności kinematycznych jakie mogą wystąpić w układzie napędowym podczas przemieszczania się po podłożu płaskim oraz podczas pokonywania wytypowanych przeszkód. Do badań przyjęto manewr skrętu o promieniu od 2 do 6 m, ze zmianą co 1m, oraz pokonywanie przeszkody typu kłoda lub murek. Wartości te przyjmowano takie same w badaniach symulacyjnych i doświadczalnych - weryfikacyjnych.
Badania symulacyjne przeprowadzono dla modelu platformy czterokołowej w środowisku MCS Adams, w którym przyjęto wstępnie szereg uproszczeń m.in. model sztywnego koła i nieodkształcalne podłoże. Wyniki przedstawiono na rys.5.4. Na ich podstawie Doktorant definiuje wniosek, że „istniejące układy antypoślizgowe przystosowane do pracy w stale określonych warunkach nie nadają się do zastosowania w LKBPL, gdyż nie pozwoliły określić stałego poziomu różnic prędkości kątowych dla poszczególnych kół”. W mojej ocenie wniosek ten jest za daleko idący.
- Badania symulacyjne modelu platformy czterokołowej w celu określenia progu mobilności, przy którym pojazd był w stanie pokonać wytypowane przeszkody. Podczas badań zmieniano współczynnik przyczepności koła do podłoża. Jego wartość dobierano tak, aby model platformy nie był w stanie pokonać przeszkody.
W modelu platformy zastosowano model koła podatnego, uwzględniającego poślizg oraz kształtową współpracę z podłożem, opracowany przez zespół Instytutu Budowy Maszyn WAT. Współczynniki sztywności i tłumienia, niezbędne w modelu, określono w oparciu o własne badania stanowiskowe. Tak opracowany współczynnik przyczepności w funkcji poślizgu przedstawiono na rys.6.9.
Przyjmując modele mechanizmów różnicowych, rys.6.11, jako uproszczenie równoległego napędu hydrostatycznego, otrzymano model napędu dla platformy z napędem na wszystkie cztery koła, ze swobodnym różnicowaniem prędkości kątowych poszczególnych kół. Maksymalny moment na danym kole był równy momentowi generowanemu przez koło o najmniejszym współczynniku przyczepności, powiększony o wartość momentu tarcia w mechanizmie różnicowym danej osi i międzyosiowym. Tak opracowany model posłużył do określenia zachowania się układu napędowego podczas pokonywania przeszkody typu murek, rys.6.14, i pochyłość terenu, rys.6.15.
Po wprowadzeniu momentu hamującego na kole z nadmiernym poślizgiem, wyniki odpowiednio na rys.6.16 i rys.6.17, stwierdzono zwiększenie zdolności pokonywania przeszkód. W przeprowadzonych badaniach przebieg momentu hamującego zdefiniowano w parametrach symulacji.
Weryfikację otrzymanych wyników przeprowadzono na prototypie platformy zbudowanej w Instytucie Robotów i Konstrukcji Maszyn WAT.
- Rozdziały 7.1÷7.5 to opis prac projektowych i wykonawczych przy prototypie. Widok platformy przedstawiony na rys.7.8 świadczy o ogromie zrealizowanych zadań, prawdopodobnie w zespole, gdyż dla jednej osoby przekraczałyby znacznie zakres pracy doktorskiej.
Rozdział 7.7, to dokumentacja układu pomiarowego na platformie badawczej z możliwością rejestracji i akwizycji danych. Przedstawiony opis dowodzi o dobrym przygotowaniu do badań.
W ramach badań wstępnych platformy, rozdział 7.8, sprawdzono:
 - Dokładność pomiaru prędkości obrotowych z czujników indukcyjnych zainstalowanych w każdym kole, enkodera w kole prawym tylnym oraz prędkości postępowej platformy wyznaczonej z prędkości obrotowej wolnego koła. Pomiaru uzyskane z czujników indukcyjnych uznano za wystarczające do potrzeb badań.
 - Oporo własne instalacji hydraulicznej, rys.7.21. Oporom tym odpowiadało ok. 9% maksymalnego ciśnienia w układzie.
 - Prędkości obrotowe kół podczas pokonywania przeszkody typu murek, rys.7.22, oraz krawężnik, rys.7.23.
- Rozdział 8 to weryfikacja badań symulacyjnych. Doktorant zastosował tu do oceny zgodności wskaźniki:
 - Oparte na analizie błędów, jak: wartość średnia, wariancja, odchylenie standardowe
 - Oparte na badaniu wzajemnej korelacji przebiegów np. współczynnik korelacji, kowariancja
 - Oparte na całkowaniu przebiegów np. wartość pola pod krzywą.Badania dotyczyły:
 - Porównania przebiegów prędkości kół podczas przemieszczania się platformy z prędkością ok. 0,5m/s. Stwierdzono, że model platformy odpowiada zachowaniu się obiektu rzeczywistego.

- Zdolności pokonywania wytypowanych przeszkód typu: murek, rys.8.4 i krawężnik, rys.8.5. Otrzymane wartości błędów pozwoliły stwierdzić, że zgodność badań symulacyjnych z badaniami na obiekcie rzeczywistym jest na zadawalającym poziomie. Zatem model symulacyjny mógł posłużyć do badań z „układem antypoślizgowym” tj. z aktywną kontrolą prędkości obrotowych za pomocą niezależnego układu hamulcowego.
- Badania zamieszczone w rozdziale 9 wykazały, że zastosowanie układu z aktywną kontrolą momentu hamowania w kole, w znaczący sposób poprawia zdolność pokonywania przeszkód. Platforma była w stanie przemieszczać się po wszystkich wytypowanych przeszkodach, które okazały się nie do pokonania przez napęd bez tego układu. Tym samym badania te, zweryfikowały tezę pracy doktorskiej i potwierdziły przydatność opracowanego napędu.

Badania przeprowadzono na trzech typach przeszkód:

- Na wzniesieniu o różnych współczynnikach przyczepności pod kołami lewej i prawej strony platformy.
- Na przeszkodzie typu garb, tylko z jednej strony platformy.
- Na przeszkodzie typu murek.

Wielkość przeszkód dobrano tak, aby platforma bez układu hamulcowego nie mogła ich pokonać.

Zaproponowano dwa modele układu z aktywną kontrolą momentu hamowania:

- Z regulowaną strefą nieczułości poślizgu i stałym zadawanym momentem hamującym, rys.9.5.
- Z regulowaną strefą nasycenia poślizgu i kontrolą ciśnienia w układzie ABS przy każdym kole, rys.9.6.

Jako kryteria oceny działania przyjęto:

- Czas pokonania przeszkody.
- Maksymalny moment hamujący na kołach.
- Wartość wejściowego momentu napędowego.

Uwzględniając powyższe kryteria posłużono się oceną punktową, rys.9.35 i 9.36 oraz tabela 9.6.

- Wnioski końcowe jako podsumowanie uzyskanych wyników nie budzą moich zastrzeżeń.

Zakres pracy, przedstawiony w skrócie powyżej, spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Plan pracy doktorskiej jest przemyślany i konsekwentnie realizowany.

W pełni zgadzam się z zaproponowanymi kierunkami dalszych badań, które Doktorant wyznaczył w oparciu o samokrytyczną analizę uzyskanych wyników.

Układ treści i opracowanie redakcyjne w swojej edytorskiej wymowie są poprawne. Nie znalazłem sformułowań, które wzbudziłyby mój niepokój a tzw. „literówki” komputerowe wskazałem osobiście Doktorantowi. Nie mniej kilka z nich powinno znaleźć wyjaśnienie, np.:

- czym różnią się pojazdy określone skrótowo: LKBPL, LBPL, BPL, itp.
- układ antypoślizgowy – czy nie lepiej używać określenia układ ograniczonego poślizgu, gdyż współpraca koła z podłożem odbywa się zawsze z poślizgiem. Jak sam Doktorant w wielu punktach pracy wykazał, współczynnik przyczepności posiada taką charakterystykę, dodatkowo różną w zależności od podłoża, np. rys.6.9 i 9.2. Spotykane często w literaturze: „układ, system antypoślizgowy” jest skrótem nie oddającym w pełni istoty zagadnienia.
- str.35 „uniknąć zjawiska mocy krążącej”. Ostrożniejszym byłoby określenie „ograniczać moc krążącą”, gdyż w wielu konstrukcjach korzysta się za zjawiska mocy krążącej, np. w mechanizmach rozdziału mocy, skrzyniach biegów z równoległym przepływem mocy, itp. Ważne żeby ją kontrolować i ograniczyć do dopuszczalnych wartości.

Omówienie wyników w bezpośredniej bliskości rysunków bądź tabel, znacznie ułatwiło ich śledzenie. Należy podkreślić przy tym zwartość bieżących podsumowań autora na każdym etapie pracy, a ponadto na utrzymanie pewnego dystansu do otrzymywanych rezultatów. Świadczy to pozytywnie o Doktorancie i Szkole profesora Konopki.

Dorobek użytkowy pracy jest wartościowy, bowiem przedstawiono prototypową propozycję platformy lądowej o wysokiej mobilności, prace konstrukcyjne przy niej, wykonanie prototypu, badania symulacyjne i stanowiskowe. Opracowane procedury i zaproponowana metodyka, świadczą o przemyślanej i uporządkowanej wiedzy w tym zakresie, a umiejętność budowy modeli matematycznych oraz ich weryfikacja za pośrednictwem programów: MSC ADAMS oraz Catia to narzędzia pracy inżynierskiej opanowane przez Doktoranta.

Co do samodzielności opracowania nie mam wątpliwości. Doktorant musiał opanować szereg nowych zagadnień. Na wyraźne wyróżnienie i podkreślenie zasługuje fakt, że w rozprawie doktorskiej mgr inż. Kacpra Spadło zaobserwować można bardzo dobre przygotowanie do prowadzenia badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Stopień rozwiązania zagadnienia w tym ujęciu tematu i celu pracy zrealizowano w pełni.

Pracę doktorską wspiera dość okazały dorobek naukowy, w postaci:

- Współautorstwa 19 artykułów: w czasopiśmie (10) i materiałach konferencji (9), w tym zagranicznych (7). Swój dorobek Doktorant ocenił następująco: H-indeks 4 Scopus, Web of Science 3
- Udział w projektach badawczych krajowych (8) i zagranicznych (2),
- Współautorstwo dwóch rozdziałów w dwóch monografiach,
- Współautorstwo dwóch wzorów przemysłowych,
- Współautorstwo jednego patentu.

Przechodząc do ogólnej oceny pracy stwierdzam, że praca mgr inż. Kacpra Tomasza Spadło reprezentuje dyscyplinę „Inżynieria Mechaniczna” i obejmuje pełny zakres: od analizy teoretycznej, poprzez badania symulacyjne, weryfikacje doświadczalne, podsumowanie i określenie kierunków dalszych prac, do których gorąco zachęcam, tym bardziej, że zbudowany prototyp i stanowiska oraz opracowane modele posiadają potencjał znacząco przekraczający potrzeby tego doktoratu. Recenzowana praca stanowi oryginalne opracowanie prototypu platformy, praktycznie przygotowanej do wdrożenia. Całość dowodzi o nabytych umiejętnościach Doktoranta do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Stawiam wniosek o wyróżnienie pracy.

Reasumując, wyrażam opinię, że dysertacja mgr inż. Kacpra Tomasza Spadło spełnia wymagania, jakie stawia obowiązująca Ustawa o pracach doktorskich (*Ustawa o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki oraz niektórych innych ustaw z dnia 21 kwietnia 2017 roku*) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

28.03.2022



Zbigniew Pawelski