

Dr hab. inż. Zbigniew Żebrowski – emerytowany prof. PW
Politechnika Warszawska
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych
Instytut Pojazdów i Maszyn Roboczych

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Kacpra Tomasza Spadło pt. „Analiza poślizgu kołowych platform wysokiej mobilności z hydrostatycznymi układami napędu jazdy”

wykonanej pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Stanisława Konopki (WAT), oraz promotora pomocniczego dr inż. Mariana Janusza Łopatki (WAT).

Podstawa wykonania opinii: pismo (bez nr.) z dnia 22.02.2022 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej, prof. dra hab. inż. Jerzego Małachowskiego. Praca doktorska została mi przesłana razem ze zleceniem wykonania recenzji.

1. TEMATYKA ROZPRAWY

Omawiana rozprawa doktorska mgr inż. Kacpra Spadło dotyczy najogólniej zagadnień związanych z poprawą mobilności Lekkich Kołowych Bezzałogowych Platform Lądowych (LKBPL). **Tematyka ta jest ważna i aktualna, biorąc pod uwagę szybki rozwój bezzałogowych platform lądowych (nazywanych platformami autonomicznymi) do różnych zastosowań, zarówno jako maszyny robocze, pojazdy przemysłowe jak też i pojazdy wojskowe.** Platformy te mogą poruszać się zarówno na podłożu odkształcalnym, jak też i po drogach (podłoże nieodkształcalne). Należy zauważyć, że brak jest dostępnej literatury na ten temat, a firmy zajmujące się tym zagadnieniem utrzymują swoje wyniki badań w tajemnicy. Dlatego też tematykę podjętą przez Doktoranta uważam za aktualną i ważną zarówno ze względów naukowych, utylitarnych jak i uzyskanie doskonałych materiałów dydaktycznych. Autor w swojej pracy realizuje kolejno poszczególne 4 etapy studium dynamiki maszyn:

W etapie I Doktorant zbudował model fizyczny robiąc założenia upraszczające.

Etap II to budowa modelu matematycznego, który opisuje model fizyczny.

Etap III to studium charakterystyki dynamicznej i czasowej rozważanego układu i badania symulacyjne.

Etapy I – III stanowią analizę projektowanej platformy.

Etap IV to synteza, tj. podjęcie decyzji projektowych, czyli przyjęcie fizycznych parametrów układu, tak aby jego własności dynamiczne były zgodne z wymaganiami.

Rozwiązanie tak postawionego studium dynamiki maszyn dla złożonego układu mechatronicznego, jakim jest LKBPL wyposażona w napęd hydrostatyczny sterowany elektronicznie **uważam za rozwiązanie problemu naukowego.** Autor nie poprzestał na uzyskaniu wyników z symulacji komputerowego modelu, ale zaprojektował także LKBPL, której prototyp został wykonany i przebadany, a uzyskane współczynniki jako wyniki z symulacji zostały skorygowane z wynikami z badań obiektu rzeczywistego dając wytyczne do poprawy konstrukcji – co stanowi **wymierny efekt utylitarny niniejszej rozprawy doktorskiej.**

2. STRUKTURA I CHARAKTERYSTYKA PRACY

Omawiana praca liczy 135 stron i podzielona jest na 10 rozdziałów. Zawiera 88 rysunków, 13 fotografii oraz 9 tabel. Bibliografia zawiera 109 pozycji, z czego 7 to strony internetowe. 49 pozycji literaturowych to publikacje z ostatniego dziesięciolecia (2012 - 2022). 57 pozycji stanowią publikacje w języku angielskim, oraz 1 w języku rosyjskim. Układ i redakcja pracy prawidłowe. Układ pracy logiczny, kolejność rozdziałów prawidłowa. Dobór materiału ilustracyjnego chociaż ilościowo liczny, jednak ograniczony do niezbędnego, trafnie dobrany. Praca napisana poprawnym językiem, wykonana starannie pod względem edytorskim. Pewien niedosyt budzi brak zamieszczenia w wykazie wszystkich użytych przez Doktoranta w pracy symboli i skrótów, co nie ułatwia jej czytania.

Należy natomiast podkreślić zamieszczanie opisów i objaśnień bezpośrednio po rysunkach i wykresach, co ułatwia czytającemu ich analizę.

Każdy z rozdziałów zakończony jest syntetycznym podsumowaniem Autora.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do pracy. Doktorant definiuje podstawową cechę lekkich kołowych bezzałogowych platform lądowych jaką jest brak operatora znajdującego się na platformie. Sterowanie najczęściej odbywa się zdalnie za pomocą obserwacji platformy z niewielkiej odległości (systemu teleoperacji), lub w sposób autonomiczny. Autor omawia także najczęstsze zastosowania bezzałogowych platform lądowych (BPL) jak:

- transport – od BPL wymaga się przemieszczania z dużymi prędkościami po drogach i terenach utwardzonych, jak również pracy w halach,
- działania ratownicze – wymaga się dużej zdolności pokonywania przeszkód, dużej zwrotności, rozwijania niewielkich prędkości przemieszczania się,
- rozminowywanie – wymaga się zdolności do rozwijania dużych sił uciągu i pracy z niewielkimi prędkościami,
- rozpoznanie i neutralizacji EOD – wymaga się dużej zwrotności oraz zdolności do pokonywania przeszkód, wymagana jest zdolność do przemieszczania się w terenie zurbanizowanym jak i niezurbanizowanym,
- inne – od BPL jako nośnika osprzętów, wymaga się zdolności do rozwijania dużych sił napędowych, oraz pracy w zróżnicowanym terenie.

Autor porównuje platformy gąsienicowe i kołowe uzasadniając przyjęcie do dalszych rozważań platformy kołowej, która ma zapewnić zdolność pokonywania przeszkód i poruszania się w trudnym terenie, co wymaga:

- zapewnienia możliwości rozwijania maksymalnej siły napędowej przez każde z kół;
- uwzględnienia możliwości występowania różnych sił przyczepności pod każdym z kół;
- zachowywania dodatniej wartości momentu napędowego pod każdym z kół tak, aby nie hamować platformy.

Układem spełniającym przedstawione wymagania jest hydrostatyczny układ napędowy z indywidualnym napędem każdego z kół.

Zastosowanie takiego rodzaju napędu powoduje jednak konieczność kontroli poślizgów poszczególnych kół i ich sterowania.

Stąd też niezbędna będzie analiza oraz badania możliwości zastosowania układów zmniejszających poślizg kół, nazywanych przez Doktoranta jako układów „antypoślizgowych” do kształtowania poślizgu Lekkich Kołowych Bezzałogowych Platform Lądowych z hydrostatycznym układem napędowym, oraz analiza ich wpływu na mobilność rozpatrywanych platform.

Rozdział 2 to omówienie i dokonanie analizy dostępnych sposobów kontroli poślizgu kół w maszynach i pojazdach. Autor omawia tu mechanizmy różnicowe i ich blokady, elektroniczne układy kontroli poślizgu, układy „asystencyjne”, oraz sposoby sterowania poślizgiem kół w hydrostatycznych układach napędowych. W wyniku analizy tych układów Doktorant stwierdza, że układy stosowane w hydrostatycznych napędach – a konkretnie zastosowanie układu hamulcowego – mogą zostać zastosowane w LKBPL. Jest to rozwiązanie zbliżone do rozwiązania stosowanego w samochodach osobowych (ASR).

Ponieważ producenci tych układów chronią je tajemnicą handlową, stąd zastosowanie tego typu układu do LKBPL wymaga opracowania i przebadania całego hydrostatycznego układu napędowego z układem zmniejszającym poślizg.

Rozdział 3 Stanowi omówienie dostępnej literatury dotyczącej współczesnych kierunków badań układów „zmniejszających poślizg”. Przeprowadzone analizy wykazały, że brak jest gotowych tego typów układów możliwych do zastosowania w hydrostatycznych układach napędowych lekkich kołowych platform wysokiej mobilności. Istniejące rozwiązania stosowane w innych pojazdach nie spełniają jednak wymagań stawianych platformom wysokiej mobilności. Z tego względu wskazane jest opracowanie i przebadanie układu kontroli i sterowania poślizgu na styku koło/podłoże, który można zastosować w Lekkich Kołowych Bezzałogowych Platformach Lądowych z hydrostatycznym układem napędowym jazdy.

Rozdział 4 Cel i zakres pracy

Ponieważ nie znaleziono w analizowanej literaturze gotowych rozwiązań sterowań układów „zmniejszających poślizg” stwierdzono, że nie ma dostępnych istniejących układów kontroli poślizgu mogących znaleźć bezpośrednie zastosowanie w lekkich, kołowych platformach wysokiej mobilności z hydrostatycznym układem napędowym.

Stąd celem pracy jest:

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

Tak postawiony cel pracy wymagał:

- określenia poziomu niezgodności kinematycznych występujących w układzie napędowym jazdy LKBPL,
- opracowania modeli symulacyjnych platform wysokiej mobilności z hydrostatycznym układem napędowym,
- budowy obiektu badawczego – lekkiej kołowej platformy z hydrostatycznym układem napędowym,
- przeprowadzenia badań identyfikacyjnych na obiekcie badawczym,
- weryfikację zbudowanych modeli symulacyjnych z obiektami rzeczywistymi,
- opracowanie wytycznych do budowy modelu układu zmniejszającego poślizg,
- badania modelu symulacyjnego układu zmniejszającego poślizg dla LKBPL,
- opracowanie otrzymanych wyników i wyciągnięcie wniosków.

Autor stwierdził, że realizacja tak założonego celu pozwoli określić, czy istnieje możliwość stworzenia i zastosowania układu „zmniejszającego poślizg” w Lekkich Kołowych Bezzałogowych Platformach Lądowych. Układ ten pozwoli również określić, czy oraz w jakim stopniu wpływa on na mobilność LKBPL.

Rozdział 5 Wymagane różnice prędkości kół występujące w LKBPL

W celu określenia wartości różnic prędkości poszczególnych kół występujących w Lekkich Kołowych Bezzałogowych Platformach Lądowych Autor przeprowadził badania pokonywania wytypowanych przeszkód reprezentatywnych dla obszaru działań lekkich platform lądowych. Badania miały na celu określenie poziomu różnic prędkości poszczególnych kół niezbędnych do prawidłowego przemieszczania się modelu platformy w założonych warunkach. Do badań wytypowano lekką platformę o masie 400kg z przegubowym układem skrętu, oraz kołowym układem bieżnym. W dostępnej literaturze nie spotkano badań niezgodności kinematycznych podobnego modelu platformy. Jako przeszkody do pokonania przez platformę wytypowano kłodę, murek, krawężnik oraz 5 różnych promieni skrętu. Model symulacyjny wykonał Doktorant w środowisku MSC Adams. Przeprowadzone badania wstępne pozwoliły na wyznaczenie wartości różnic prędkości jakie może dopuszczać układ regulacji poślizgu, aby uniknąć możliwości powstawania niekorzystnego zjawiska mocy krążącej.

Rozdział 6 Wstępne badania symulacyjne platformy wysokiej mobilności

W celu określenia wpływu układu zmniejszającego poślizg w lekkich platformach wysokiej mobilności przeprowadzono badania symulacyjne pokonywania wytypowanych przeszkód przez model lekkiej platformy kołowej w środowisku MSC Adams korzystając z metody **Multi Body**.

Przyjęto, że model zostanie poddany badaniom podczas pokonywania wytypowanych przeszkód takich jak: kłoda, ścianka pionowa, murek, schody oraz wzniesienie terenu. Do budowy modelu przyjęto masy poszczególnych elementów platformy, oraz jej wymiary.

Pozwoliło to na zbudowanie modelu z wykorzystaniem środowiska **Catia** w celu wyznaczenia poszczególnych środków ciężkości. Po określeniu geometrii oraz rozkładu mas platformy zbudowano dynamiczny model symulacyjny. Doktorant zastosował do budowy modelu platformy model podatnego koła uwzględniającego poślizg oraz kształtową współpracę z podłożem, który został opracowany przez zespół Instytutu Budowy Maszyn WAT. Współczynniki sztywności i tłumienia dobrano na podstawie badań na obiekcie rzeczywistym na specjalnym stanowisku badawczym. Wynikiem badań było określenie współczynnika sztywności promieniowej opony. Wartości współczynników tłumienia dobrano w taki sposób aby osiągnąć podawaną w publikacjach wartość bezwymiarowego współczynnika tłumienia. Wykorzystując otrzymane wyniki przeprowadzono badania symulacyjne modelu koła podatnego pod kątem charakterystyki współczynnika przyczepności modelu koła podatnego w zależności od poślizgu. Otrzymana charakterystyka jest zbliżona do charakterystyki literaturowej (rys. 69), co pozwoliło Doktorantowi wnioskować o poprawności działania zbudowanego modelu koła.

Zbudowany model komputerowy został poddany badaniom symulacyjnym pokonywania wytypowanych przeszkód typu murek oraz pochyłość terenu, które są przeszkodami reprezentatywnymi dla obszarów w jakich przemieszczają się LKBPL.

Przeprowadzone badania potwierdziły poprawność działania modelu układu napędowego – zarówno pod kątem dystrybucji momentu napędowego jak i różnicowania prędkości obrotowych poszczególnych kół.

Uzyskane wyniki badań pozwoliły Autorowi na wstępne badania układu zmniejszającego poślizg (zwanego w pracy układem antypoślizgowym).

Celem badań było określenie, czy zastosowanie układu hamującego poszczególne koła poprawia zdolność do pokonywania przeszkód oraz, czy układ jest przydatny dla LKBPL.

Przeprowadzone badania modelu Lekkiej Kołowej Bezzałogowej Platformy Lądowej wykazały, że zastosowanie układu hamującego kół będących w nadmiernym poślizgu zwiększa

zdolność do pokonywania wytypowanych przeszkód przez platformę, a tym samym zwiększa jej mobilność. Na zakończenie rozdziału Doktorant stwierdził, że w celu dokładniejszego zbadania zjawisk i możliwości poprawy zdolności pokonywania przeszkód **należy przeprowadzić badania weryfikacyjne zbudowanego modelu poprzez badania na obiekcie rzeczywistym**. W razie potrzeb należy wykonać modyfikację poszczególnych parametrów modelu w celu uzyskania wyników symulacyjnych jak najbardziej zbliżonych do badań na obiekcie rzeczywistym, a być może także i modyfikację poszczególnych parametrów modelu w celu uzyskania wyników symulacyjnych jak najbardziej zbliżonych do badań na obiekcie rzeczywistym („strojenie współczynników modelu”).

Rozdział 7 Badania identyfikacyjne LKBPL

W celu walidacji zbudowanego modelu symulacyjnego należało przeprowadzić badania na obiekcie rzeczywistym i porównać otrzymane wyniki obrazujące zachowanie się platformy w porównywalnych warunkach.

W tym celu Autor zaprojektował platformę, a w celu określenia dokładnej wielkości i kształtu ramy oraz rozmieszczenia poszczególnych elementów Doktorant dobrał konkretne komponenty układu napędowego.

Zaprojektowana konstrukcja ramy nośnej została poddana analizie wytrzymałościowej MES w programie Catia. Po uzyskaniu pozytywnych wyników na podstawie modelu została stworzona przez Autora dokumentacja wykonawcza, a następnie zlecono wykonanie platformy badawczej.

Po wykonaniu obiektu rzeczywistego przebadano go zgodnie z założonym programem i przyjętą metodyką. Aby przeprowadzić badania weryfikacyjne modelu zbudowano układ pomiarowy na platformie badawczej. Wykonano badania prędkości obrotowych poszczególnych kół jezdnych, oraz określono dokładności ich pomiaru.

Wyznaczono także opory własne układu napędowego, oraz zmierzono prędkości obrotowe kół podczas pokonywania przeszkód.

Badania powstałej platformy zostały przeprowadzone na dwóch rodzajach podłoża (mała i duża przyczepność) na przeszkodach o podobnej geometrii – przeszkoda typu krawężnik. Celem badań było zmierzenie prędkości obrotowych poszczególnych kół podczas pokonywania wytypowanej przeszkody.

Uzyskane wartości prędkości obrotowych pozwoliły na określenie zgodności wyników otrzymywanych z badań na modelu symulacyjnym z wynikami otrzymanymi podczas badań na obiekcie rzeczywistym.

Na podstawie przeprowadzonych badań otrzymano charakterystyki przebiegu prędkości obrotowych poszczególnych kół, które posłużyły do walidacji modelu symulacyjnego.

Rozdział 8 Weryfikacja modelu symulacyjnego

Mając zbudowany model symulacyjny przeprowadził Autor badania walidacyjne modelu platformy. Badania miały na celu zweryfikowanie modelu symulacyjnego, tak aby zachowywał się w sposób jak najbardziej zbliżony do obiektu rzeczywistego. W trakcie symulacji zastosowano niezmienną w czasie wartość prędkości poruszającej się platformy. Do oceny otrzymanych wyników i ich zgodności wykorzystano wskaźniki jakości modelowania, które Doktorant podzielił na trzy podstawowe grupy:

- wskaźniki oceniające różnice pomiędzy wartościami zidentyfikowanymi podczas badań na obiekcie rzeczywistym oraz w trakcie badań numerycznych jako błąd metody (wartość średnia, wariancja, odchylenie standardowe) - **średni błąd względny dla wszystkich kół wyniósł 4.25%**,

- wskaźniki oparte na badaniu wzajemnej korelacji przebiegów uzyskanych podczas badań na obiekcie rzeczywistym oraz w trakcie badań numerycznych (współczynnik korelacji, kowariancja) - **wskaźniki korelacji oscylują w granicy 0,9,**
- wskaźniki oparte na całkowaniu przebiegów otrzymanych w trakcie badań na obiekcie rzeczywistym oraz w trakcie badań numerycznych i porównaniu ich wartości (wartość wyliczonego pola pod krzywą) - **średnia różnica dla wszystkich kół to około 4,3%.**

Rozdział 9 Badania symulacyjne platformy wysokiej mobilności z układem „antypoślizgowym” (zmniejszającym poślizg)

Dysponując zwalidowanym modelem symulacyjnym LKBPL Doktorant przeprowadził badania wpływu sterowania poślizgu poszczególnych kół na poprawę zdolności przemieszczania się platformy w terenie. Model platformy wysokiej mobilności z hydrostatycznym układem napędowym został rozbudowany o układ zmniejszający poślizg działając hamująco na elementy napędowe poszczególnych kół. Autor badał zbudowane przez siebie dwa modele: 1) ze stałym zadawanym momentem hamującym, 2) z kontrolą ciśnienia w układzie typu ABS w każdym kole.

Przeprowadzone badania modelu lekkiej kołowej platformy lądowej wykazały znaczący wzrost mobilności modelu platformy wyposażonej w układ zmniejszający poślizg poszczególnych kół (pokonano wszystkie przeszkody), w stosunku do modelu bez takiego układu, który nie był w stanie pokonać wytypowanych przeszkód.

Wykonane analizy wykazały także, że niezasadne jest zwiększanie maksymalnego momentu hamującego powyżej 25% momentu wejściowego, co wiązałoby się z koniecznością stosowania bardziej zaawansowanych układów do kontroli prędkości obrotowych poszczególnych kół niż przyjęta w pracy metoda oparta o układy hamulcowe.

Rozdział 10 Podsumowanie i wnioski końcowe

Platformy lądowe z napędem hydrostatycznym są coraz częściej spotykanymi platformami w zastosowaniach zarówno cywilnych jak i militarnych. Stosowane w nich układy jezdne zapewniają zdolność przemieszczania się w zróżnicowanych warunkach terenowych. Jednym z ważniejszych parametrów wpływających na rozwijanie sił napędowych jest kontrolowany poślizg na styku koło - podłoże.

W samochodach terenowych, wozidlach lub ciągnikach rolniczych stosuje się rozwiązania bazujące na kontroli poślizgu poszczególnych kół poprzez zastosowanie mechanizmów różnicowych o zwiększonym tarciu wewnętrznym lub układów elektronicznych współpracujących z układem hamulcowym.

Specyfika Lekkich Kołowych Bezzałogowych Platform Lądowych – ich masa, prędkości przemieszczania się oraz przeszkody jakie muszą pokonywać są skrajnie różne od pojazdów terenowych lub ciągników rolniczych. Powoduje to, że dostępne układy kontroli poślizgu nie nadają się do zastosowania bezpośrednio w LKBPL z hydrostatycznym układem napędowym. Dlatego też Autor postawił jako cel pracy stworzenie i przebadanie układu kontroli poślizgu w Lekkich Kołowych Bezzałogowych Platformach Lądowych wysokiej mobilności z hydrostatycznym układem napędowym jazdy w konfiguracji równoległej.

W celu realizacji postawionego zadania:

- stworzono szereg modeli symulacyjnych LKBPL;
- przeprowadzono badania symulacyjne pokonywania wytypowanych przeszkód przez model LKBPL niewyposażony oraz wyposażony w układ ograniczający poślizg.

Wykonane analizy wykazały, że istnieje możliwość znacznego zwiększenia mobilności LKBPL z hydrostatycznym układem napędowym poprzez kształtowanie poślizgu pomiędzy kołem a podłożem.

- zbudowano obiekt badawczy;

- przeprowadzono badania pokonywania wytypowanych przeszkód;
- dokonano walidacji modelu;
- w modelu zastosowano podatny model koła;
- stworzony model rozbudowano o układ zmniejszający poślizg poszczególnych kół napędowych, w którym można było regulować moment aktywacji, oraz wartości momentów hamujących poszczególne koła platformy;
- badania wykazały, że zastosowanie układu zmniejszającego w sposób kontrolowany poślizg na styku koło – podłoże, w znaczący sposób poprawia mobilność i zdolność pokonywania przeszkód przez Lekkie Kołowe Bezzałogowe Platformy Lądowe z hydrostatycznym układem napędowym.

Przeprowadzone przez Doktoranta badania jednoznacznie wykazały, że zastosowanie układu kontroli poślizgu ma istotny wpływ na zwiększenie mobilności - rozumiane jako zdolność do przemieszczania się w terenach o małej przyczepności, oraz pokonywania przeszkód terenowych przez Lekkie Kołowe Bezzałogowe Platformy Lądowe z hydrostatycznym układem napędowym jazdy.

Tym samym Autor z powodzeniem osiągnął postawiony cel pracy.

Praca potwierdza wysoką skuteczność zastosowanego układu zmniejszającego poślizg opartego o układ hamulcowy - do kontroli i sterowania poślizgu kół w LKBPL z hydrostatycznym układem napędowym.

Jako wniosek końcowy Autor zaproponował kierunek dalszych badań mających na celu ocenę przydatności i możliwości wykorzystania układu „zmniejszającego poślizg” w przypadku przemieszczania się platformy po gruntach odkształcalnych.

3. OCENA OGÓLNA I UWAGI DOTYCZĄCE ROZPRAWY

Zaproponowany temat rozprawy jest aktualny i ważny zarówno z punktu widzenia naukowego jak i inżynierskiego. Wpisuje się bardzo dobrze w trend prac badaczy i naukowców zajmujących się rozwojem napędów jazdy platform i pojazdów wyposażonych w hydrostatyczny napęd jazdy. Dotyczy to zarówno maszyn wolnobieżnych jak i Lekkich Kołowych Bezzałogowych Platform Lądowych.

Według dostępnej literatury, w aktualnym stanie wiedzy i techniki nie jest znany dostępny model, który pozwalałby na zwiększenie mobilności i zdolność pokonywania przeszkód przez Lekkie Kołowe Bezzałogowe Platformy Lądowe z hydrostatycznym układem napędowym.

Z uwagi na nieustannie rosnącą liczbę maszyn tej klasy Doktorant zauważył pilną potrzebę opracowania metody modelowania Lekkich Kołowych Bezzałogowych Platform Lądowych, która umożliwi zwiększenie ich mobilności i uznał to jako nadrzędny cel pracy.

Oprócz tego Autor wyznaczył jeszcze dwa dodatkowe cele rozprawy:

Cel poznawczy pracy, którym jest identyfikacja i opis matematyczny zjawisk skutkujących zmniejszaniem poślizgu kół w układach jezdnych platform kołowych.

Cel użytkarny pracy jako sformułowanie wytycznych dla praktyki inżynierskiej dotyczących ograniczeń wartości momentów hamujących w kołowych układach jezdnych z punktu widzenia zwiększenia ich mobilności.

Do materiału zgromadzonego w poszczególnych rozdziałach pracy odniosłem się wcześniej w p.2 dobrze go oceniając.

Z punktu widzenia dokonań Doktoranta zarówno naukowych, badawczych oraz nowatorskich elementów pracy materiały zawarte w rozdziałach 7 - 9 są najważniejsze.

Jednocześnie należy stwierdzić, że uzyskane przez Doktoranta wyniki są zarówno nowatorskie jak i użyteczne w dalszych badaniach i modelowaniu nowych projektowanych konstrukcji LKBPL.

Podsumowując stwierdzam, że materiał zawarty w pracy spełnia z dużym nadmiarem wymagania stawiane pracom doktorskim. Doktorant zebrał wiele wyników z badań i identyfikacji oraz analizy zbudowanych modeli matematycznych. Świadczy o tym skondensowana forma przedstawienia uzyskanych wyników w postaci tabel i wykresów na podstawie przeprowadzonych symulacji i prac badawczych.

Jako uwagę krytyczną podaję:

- brak zamieszczenia w wykazie oznaczeń użytych w pracy wszystkich przyjętych przez Autora symboli oznaczeń,
- brak zamieszczenia w pracy schematu hydraulicznego z wykazem elementów, co utrudnia czytanie pracy, oraz
- brak podania położenia środka ciężkości platformy.

4. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

W omawianej pracy doktorskiej nie znalazłem błędów merytorycznych, a jedynie „literówki”, przejęzyczenia i skrót myślowe, których trudno się ustrzec w tego typu opracowaniach. Usterki te omówiłem na spotkaniu z Doktorantem.

Podam tu tylko kilka przykładowych, np.:

Str. 7 – „...pracy na halach” powinno być: „pracy w halach”;

Str. 7 – skrót „EOD” brak wyjaśnienia znaczenia użytego skrótu. Czytelnicy związani z wojskiem rozumieją go prawidłowo jako „Explosive Ordnance Disposal” (unieszkodliwianie ładunków wybuchowych), ale też w języku angielskim skrót „EOD” ma i inne znaczenia: „end of discussion” (koniec dyskusji), oraz „end of day” (na koniec dnia);

Str. 8 – „Układu gaśnicowe...” powinno być: „Układy gaśnicowe...”;

Str. 18 – „czujnik prędkości skrzyni biegów” powinno być: „czujnik prędkości wałka wyjściowego skrzyni biegów”;

Str. 25/26 – „wprowadzenie dodatkowych elementów dławiących przepływ do układu” powinno być: „wprowadzenie do układu dodatkowych elementów dławiących przepływ”;

Str. 42 – Jest Rys. 6.4, a zgodnie z kolejnością powinien być jako Rys. 6.5;

Str. 56 – „poz. [149]” – taka w spisie literatury nie istnieje;

Str. 85 – Powołanie się na rys. 7.4 a zgodnie z kolejnością powinien być jako rys. 8.4;

Str. 91 – Powołanie się na rys. 8.1 a zgodnie z kolejnością powinien być jako rys. 9.1;

Str. 94 – „...działał z stałą wartością...” powinno być: „ze stałą wartością...”;

Str. 101 – „...wystąpienia...” powinno być: „wystąpienia”;

Str. 119 - 122 – brak rysunku 9.34;

5. KOŃCOWA OCENA PRACY

Omawiana rozprawa doktorska mgr inż. Kacpra Spadło zawiera szereg nowych interdyscyplinarnych wyników poznawczych. Uzupełniają one w tym zakresie stan wiedzy (nieliczne i wrywkowe publikacje wyników) z tej tematyki. Rozprawa ta przede wszystkim wnosi oryginalne wnioski w zastosowaniu do praktyki wdrożeniowej.

Przekazane Doktorantowi do dyskusji uwagi recenzenta dotyczyły edycji rozprawy i nie umniejszają jej wartości merytorycznej.

Recenzent jest pełen uznania dla Doktoranta za uzyskanie interesujących wyników naukowo-badawczych w przedłożonej rozprawie doktorskiej, która stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego i wartościowy wkład użyteczny do dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Co do samodzielności wykonania pracy nie mam żadnych wątpliwości, ponieważ praca napisana jest w sposób jasny i logiczny i nie ma w niej niedomówień.

Doktorant wykazał się opanowaniem zarówno modelowania złożonych układów dynamicznych i ich symulacją, jak również posługiwaniem się nowoczesnymi programami inżynierskimi, wykonując symulacje w środowisku **MSC Adams** korzystając z metody **Multi Body**, czy wyznaczając położenia środków ciężkości w środowiska **Catia**, oraz poddanie analizie wytrzymałościowej programem **MES** zaprojektowanej przez siebie ramy platformy.

Mgr inż. Kacper Spadło ma też znaczny dorobek naukowy: 19 publikacji (omówiłem je w p. 2). **H- indeks 4 Scopus, 3 Web of Science.** Brał udział w 8 krajowych projektach badawczych, oraz w 2 zagranicznych. Jest autorem 2 rozdziałów w 2 monografiach, współautorem 2 wzorów przemysłowych, oraz współautorem 1 patentu.

Biorąc pod uwagę przedstawiony mi do zaopiniowania materiał, wysoki poziom modelowania złożonych dynamicznych układów, oryginalność rozwiązania w rozprawie istotnego zadania naukowego, a tym samym fakt potwierdzenia umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych i badawczych uważam, że przedłożona rozprawa mgr Kacpra Spadło może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych. Spełnia ona bez zastrzeżeń wymagania dla rozpraw doktorskich określone w Ustawie z 2003 r. (Dz.U. z 2003 r. nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami (Dz.U. z 2005 r. nr 164 poz. 1365), oraz z dnia 21 kwietnia 2017 roku o stopniach i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki i może być przedmiotem publicznej obrony.

Jednocześnie informuję Pana Przewodniczącą Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej, że wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej przeze mnie rozprawy doktorskiej.

Niniejszą opinię przedkładam Przewodniczącemu Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej, zleciennodawcy powyższej recenzji, prof. dr hab. inż. Jerzemu Małachowskiemu.



Warszawa, 09.04.2022 r.

