

dr hab. inż. Andrzej GĘBURA
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
Zakład Awioniki
ul. Księcia Bolesław 6, 01-494 Warszawa
andrzej.gebura@itwl.pl

Warszawa 03.03.2023 r.

RECENZJA rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Jerzego SZURA

**pt. „Sterowanie i synchronizacja serwozaworów hydraulicznych do
zastosowań w lotniczym siłowniku tandemowym wykonanym w technologii
DMLS”**

**wykonanej pod opieką promotora Pana dr. hab. inż. Grzegorza Kopeckiego, profesora
Politechniki Rzeszowskiej**

Podstawa prawna opracowania recenzji: pismo Prorektora ds. nauki dr. hab. inż. Lesława GNIEWKA, profesora Politechniki Rzeszowskiej z dnia 24.01.2023 r.)

1. Ocena wyboru tematyki rozprawy doktorskiej oraz zasadność podjęcia tematu

Współczesny rynek lotniczy funkcjonując w warunkach silnej i wciąż rosnącej konkurencji, budując coraz większe, a w przypadku wojskowych statków powietrznych, o coraz większej manewrowości statki powietrzne, wymaga od producentów dostarczania systemów sterowania o jak najwyższej jakości i niezawodności. Obecnie, pomimo zastosowania coraz większej liczby elementów elektrycznych, systemy hydrauliczne są niezbędne zwłaszcza przy wysokich prędkościach przelotowych powyżej 500 km/h oraz przy dużych (powyżej 10 ton) masach statku powietrznego – obciążenia statyczne i dynamiczne na płaszczyzny sterujące są wówczas tak duże, że na dzień dzisiejszy tylko siłowniki hydrauliczne gwarantują niezawodność i skuteczność sterowania. Dążenie do zwiększania niezawodności sterowania zmusza Producentów do zdwajania siłowników hydraulicznych – zwykle produkowane są tandemy dwóch siłowników w jednej obudowie sterowane jednym wspólnym rozdzielaczem hydraulicznym. Wspólny rozdzielacz hydrauliczny może mieć pewne błędy wykonawcze lub błędy spowodowane zużyciem eksploatacyjnym i wówczas część energii z tłoków siłowników może być kierowana na wewnętrzny przepływ energetyczny (pomiędzy tłokami) a w skrajnych przypadkach może dojść do zablokowania

się ruchu obu tłoków. Aby do tego nie dopuścić Doktorant proponuje, dotychczas nie stosowane w lotnictwie, sterowanie każdego z siłowników oddzielnie z precyzyjną synchronizacją.

Do przemieszczenia każdego z tych rozdzielaczy zastosował osobny czterokanałowy silnik elektryczny z korbowodem i z pętlą sprzężenia zwrotnego w postaci zewnętrznego (umieszczonego poza silnikiem elektrycznym) czujnika kąta zapewniającego kontrolę położenia kąтового silnika a stąd pośrednio do położenia suwaka rozdzielacza. Zastosowanie korbowodu umożliwia duże wzmocnienie (i wysoką wartość momentu zamachowego) w chwili uruchomienia układu nadążnego i jego zmniejszanie w miarę osiągnięcia pozycji docelowej co zwiększa stabilność układu w chwili osiągnięcia pozycji docelowej.

Przedstawione przez Doktoranta rozwiązanie nabiera szczególnie istotnego znaczenia w systemach w systemach typu pośredniego czyli sterowania „po drucie” (Fly by Wire) a więc w systemach bez połączenia mechanicznego drążka sterowania ze wzmacniaczem hydraulicznym. We wcześniejszych rozwiązaniach sterowania za pośrednictwem cięgien mechanicznych, w przypadku awarii wzmacniacza hydraulicznego możliwe było sterowanie ręczne oczywiście kosztem wysokiego wysiłku fizycznego załogi. W przypadku systemu Fly by Wire jest to niemożliwe. Dlatego też niezawodność układu hydraulicznego nabiera w tym kontekście szczególnego znaczenia. Stąd powstała konieczność montowania podwójnego zespołu wzmacniaczy hydraulicznych w połączeniu tandem ze wspólnym suwakiem rozdzielacza przepływu płynu hydraulicznego co zapewniało synchronizację ruchu obu tłoków głównych ale, jak to wcześniej powiedziano, wprowadziło straty energii przy wszelkiego typu wadach wykonawczych lub zużyciowych – Autor zastosował więc osobne rozdzielacze synchronizowane ze sobą. Taki pomysł nie jest całkowicie nowy, gdyż istnieją konstrukcje wzmacniaczy hydraulicznych pracujących w tandemie ale są zwykleysterowywane przez osobne elektromagnesy mają one większe przecieki wewnętrzne i większy pobór mocy.

Tematyka rozprawy doktorskiej odpowiada zatem światowym trendom w tej dziedzinie i jest dobrze umotywowana, zarówno pod względem poznawczym, jak i użytkowym.

Biorąc pod uwagę powyższe informacje, oceniam tematykę rozprawy doktorskiej jako aktualną i zgodną z potrzebami rynku lotniczego.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska zawiera 167 stron maszynopisu, jest podzielona na 5 rozdziałów, poprzedzonych wstępem i zakończonych podsumowaniem. Jedne z pierwszych stron pracy stanowi spis ważniejszych oznaczeń i skrótów w niej użytych, co przy ich mnogości znakomicie ułatwia zrozumienie i nawigację po jej treści. W rozprawie doktorskiej zamieszczono 68 rysunków zawierających zdjęcia, schematy i wykresy oraz 11 tabel. Wykaz literatury obejmuje 81 pozycji, w tym 7 współautorstwa Doktoranta.

Przedstawiona kompozycja pracy jest właściwa, poszczególne rozdziały tworzą logiczną i spójną całość. Układ pracy jest poprawny, czyli można wyraźnie podzielić ją na część stanowiącą przegląd literatury tematu, następnie po jego podsumowaniu przedstawiony został cel i zadania pracy. Kolejno w części będącej opisem badań własnych przedstawiono ich metodykę, wyniki badań, ich analizę oraz podsumowanie lub wnioski z badań. Całość pracy zamykają wnioski końcowe.

Tytuł rozprawy odzwierciedla jej treść, jednakże jego końcówka „...wykonanym w technologii DMLS” jest w kontekście całej pracy zbędna a nawet częściowo myląca. Rozumiem, że autor świetnie zna i umie się posługiwać technologią DLMS, tj technologią projektowania i wytwarzania podzespołów metodą bezpośredniego spiekania laserowego metali, o czym świadczy zaprojektowanie i wykonanie zmodyfikowanego elektrozaworu tandemowego, ale ta tematyka mogłaby z powodzeniem stanowić treść oddzielnego doktoratu. Tymczasem w niniejszej pracy stosunkowo niewiele jest powiedziane o mankamentach związanych ze stosowania technologii DLMS w odniesieniu do wytrzymałości konstrukcji opracowanego i wykonanego przez Autora wzmacniacza hydraulicznego. Doktorant tym bocznym wątkiem nawet częściowo odwraca uwagę Czytelnika od wysokich zalet parametryczno-konstrukcyjnych opracowanego i wyprodukowanego elektrozaworu. Autor powinien ten jak i inne nadmiernie rozbudowane poboczne tematy zmniejszyć do minimum, aby nie zaciemniać wysokich cech użytkowych opracowanej konstrukcji. Nawiasem mówiąc wątki te świadczą o b. wysokiej wiedzy fachowej Doktoranta w dziedzinie systemów sterowania w szczególności w rozwiązaniach konstrukcyjnych wzmacniaczy hydraulicznych. Opisy porównawcze innych systemów sterowania powinny być jednak bardziej opisowe, podczas gdy autor wymienia zbyt wiele nazw i typów nie znanych dla przeciętnego czytelnika. Szczegóły powinny być przeniesione do załącznika, natomiast Autor powinien szczegółowo rozwijać głównie własne dokonania, które są niebagatelne, ale nikną na tle „konkurencyjnych” konstrukcji w taki sposób że są niekiedy niewidoczne.

Wątki poboczne nie umniejszają wartości merytorycznej pracy ale zaciemniają czytelność przekazu co do b. wysokich i oryginalnych właściwości opracowanej konstrukcji a właściwie nawet nowego prawie rewolucyjnego podejścia do konstrukcji wzmacniaczy hydraulicznych spełniających najnowsze wyzwania w technice rozwoju sterowania nowoczesnym statkiem powietrznym.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów oraz pięciu dodatków oznaczonych literami od A do E.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp do pracy. Zawarto w nim opis problemu, cel oraz tezę pracy.

W rozdziale drugim, stanowiącym przegląd bibliograficzny na podstawie dostępnych źródeł, opisano rodzaje rozdzielaczy hydraulicznych, zaworów proporcjonalnych oraz serwozaworów. Zawarto również opis siłowników tandemowych stosowanych w lotnictwie. Zawarto opis siłownika tandemowego firmy Yasa, który stanowi obiekt badań oraz w którym wdrażane są proponowane rozwiązania opisane w niniejszym doktoracie realizowanym w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy. Układy te wykorzystywane są w lotniczych systemach sterowania, opisano więc struktury systemów sterowania wspomaganym oraz typu pośredniego (Fly by Wire). Ponieważ celem pracy jest zrealizowanie układu sterowania, dokonano przeglądu możliwych do zastosowania algorytmów sterowania nie tylko pojedynczym serwozaworem, ale również przeanalizowano problem synchronizacji.

W rozdziale trzecim zrealizowano model matematyczny użytego silnika czterokanałowego trójfazowego z magnesami trwałymi oraz model rozdzielacza serwozaworu. Dokonano porównania rodzajów sterowania uzwojeniami silnika oraz wpływ ilości zasilanych kanałów na parametry pracy. Na podstawie przeprowadzonych badań na obiekcie rzeczywistym, skorygowano parametry modelu symulacyjnego.

W rozdziale czwartym zaprojektowano algorytmy sterowania pojedynczym serwomechanizmem. Wykorzystano do tego celu zrealizowany układ sterowania. Skuteczność zaproponowanych rozwiązań potwierdziły symulacje komputerowe, jak również badania na rzeczywistym obiekcie. Zaproponowano również skuteczne algorytmy synchronizacji dwóch serwozaworów. Opracowana została inżynierska metodyka doboru współczynników wzmocnień układu synchronizacji.

W rozdziale piątym przedstawiono wnioski oraz podsumowanie zrealizowanych prac, wskazano również możliwości realizacji dalszych prac badawczo-wdrożeniowych.

W dodatku A przedstawiono parametry elektryczne zastosowanego silnika. W dodatkach B do E przedstawiono rozszerzone wyniki badań opisanych w rozprawie.

Całość pracy zamyka wykaz literatury obejmujący 104 pozycje. Autor stosuje zasadę zgodną z pkt. 9.2 normy PN-ISO 690:2002 „Dokumentacja. Przypisy bibliograficzne. Zawartość, forma i struktura”. Literatura została uporządkowana w kolejności alfabetycznej wg Autorów. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że duża część literatury pochodzi z okresu po 2000 roku. Świadczy to o tym, że Doktorant w dysertacji wykorzystał najnowsze informacje w zakresie przedmiotowego tematu.

3. Ocena merytoryczna rozprawy i uwagi szczegółowe

Wartość merytoryczną pracy oceniam jako wysoką. Jednakże forma przekazu a w szczególności rozwinięte wątki boczne stanowiłyby dobrą książkę techniczną, lecz doktorat powinien, moim zdaniem, jaśniej przekazać swoje, jak to wcześniej ująłem, wysokie wręcz rewolucyjne rozwiązania techniczne w swojej konstrukcji wzmacniacza hydraulicznego.

Autor zastosował do przemieszczania suwaka sterującego zaworu rozdzielczego czterokanałowy trójfazowy silnik elektryczny sterowany elektronicznie (synchronizowany w zależności od położenia kąтового sygnałem z czujnika hala) z magnesami trwałymi naklejonymi na wirniku (tu wirnik wytwarza strumień magnetyczny wzbudzenia a nie stojan jak w „klasycznych” silnikach, gdzie wzbudzenie realizowane jest przez magnesy lub elektromagnesy zamontowane na stojanie), dzięki czemu nie ma tu komutatora ani szczotek komutacyjnych. Silnik ten stosowany w technice lotniczej pod symbolem PMSM (silnik synchroniczny z magnesami trwałymi) od pewnego czasu służy w niektórych konstrukcjach tandemowych wzmacniaczy hydraulicznych wspólnego suwaka rozdzielacza hydraulicznego. Silnik ten nie był dotychczas stosowany w rozdzielonym systemie suwak rozdzielacza hydraulicznego – serwowmotor. To rozdzielenie zaproponował po raz pierwszy i wykonał Doktorant. Autor uczestniczył w końcowej fazie jego projektowania (przeznaczonego do innych celów) dzięki czemu poznał dobrze jego właściwości. Dzięki temu już na etapie projektu wstępnego i uznał go (b. słusznie), że będzie miał optymalne właściwości w systemie sterowania synchronicznego dwóch osobnych suwaków zaworu rozdzielczego, gdyż:

- a) Silnik PMSM ma sinusoidalny rozkład indukcji magnetycznej w czasie swojej pracy – gwarantuje to płynne bez drgań kątowych przemieszczanie kąтового wału silnika;

- b) W czasie zmniejszania prędkości kątowej (przy zbliżaniu się do zadanego przez pilota położenia kąowego elementów sterowania aerodynamicznego kontrowanego przez czujnik hala), oraz podczas zatrzymywania suwaka rozdzielacza hydraulicznego jest łagodne przejście bez oscylacji i uderzeń kątowych;
- c) Silnik powyższy nie ma szczotek ani komutatora a więc nie wymaga praktycznie biorąc żadnych prac konserwacyjnych;
- d) Sterowanie silnika odbywa się dzięki tranzystorom pracującym w trybie quasi-dyskretnym na zasadzie zbliżonej do działania przerzutnika sterowanymi sygnałami z czujnika hala. Przy sterowaniu quasi-dyskretnym możliwe jest precyzyjne synchronizowanie wartości chwilowej prędkości kątowej obu silników a więc i obu napędzanych przez te silniki suwaków rozdzielaczy hydraulicznych;
- e) Silnik (4-fazowy) ma wysoki poziom niezawodności – w przypadku uszkodzenia (przepalenia się) jednej z faz trzy pozostałe fazy będą wystarczające do wytworzenia odpowiedniego momentu siły, zapewnienia wymaganej (wymuszonej przez pilota) dynamiki jego zmian i płynności ruchu.

Ponadto silniki te mają także, niezależnie od specyficznych cech optymalnie wykorzystanych przez Doktoranta w jego konstrukcji podwójnego wzmacniacza hydraulicznego z osobnymi i synchronizowanymi napędami suwaków rozdzielaczy hydraulicznych, także wiele niebagatelnych korzystnych cech jak:

- 1) Duża niezawodność;
- 2) Prosta konstrukcja;
- 3) Duża przeciążalność momentem mechanicznym;
- 4) Sztywna charakterystyka moment – prędkość;
- 5) Duży iloraz mocy na wale silnika do masy i objętości.

Dobranie silnika czterokanałowego trójfazowego jest bardzo celną i oryginalną decyzją Autora – jest to, moim zdaniem, udany kompromis pomiędzy „klasycznym” silnikiem trójfazowym a silnikiem wielofazowym sterowanym impulsami przesuniętymi w fazie. Silnik trójfazowy w układzie jednokanałowym zapewnia płynne zmiany prędkości obrotowej w procesie sterowania ale po utracie np. przepaleniu się lub zwarcia w jednej z cewek uzwojenia stojana, silnik ten skokowo traci moc. Silnik wielofazowy sterowany impulsowo (impulsami przesuniętymi w fazie) powoduje mikro- wahania przy zanikaniu strumienia magnetycznego

jednej fazy względem skokowo narastającego impulsu kolejnej fazy. Wiadomym jest, że w cewkach elektrycznych uzwojenia stojana (zgodnie z regułą przekory) strumień zanika z pewną stałą czasową, co powoduje że dla małowymiarowych silników trudno jest utrzymać płynne pociąganie wirnika (z magnesami stałymi) przez częściowo nawarstwiające się strumienie magnetyczne pod poszczególnymi nabiegunnikami. W wyniku tych zjawisk i nieuniknionych błędów wykonania) ruch kątowy wału takiego silnika obfitowałby w lokalne ruchy drgające. Przyjęcie koncepcji zastosowania silnika czterokanałowego zapewniło także (jak wspomniałem w p. e)) płynność przemieszczania wału i jednocześnie podwyższyło niezawodność – w chwili uszkodzenia jednej z faz silnik miałby dalej znaczny moment mechaniczny i mógłby dalej (synchronicznie z drugim silnikiem) napędzać suwak rozdzielacza hydraulicznego.

Od połowy doktoratu Autor opisuje model matematyczny układu oraz symulacje wykonane na tym modelu.

Wkładem merytorycznym Doktoranta do poznania i poszerzenia wiedzy na temat procesów sterowania dwoma serwozaworami pracującymi synchronicznie w układzie hydraulicznym zasilania siłownika tandemowego są:

- metody oraz algorytmy sterowania dwoma serwozaworami pracującymi synchronicznie z zastosowaniem silników czterokanałowych trójfazowych z magnesami trwałymi,
- układ synchronizacji dwóch mechanizmów serwozaworów,
- algorytm umożliwiający dostrojenie regulatora synchronizującego, wzorujący się na metodzie Ziglersa-Nicholsa.

Moim zdaniem prezentowane wyniki badań są nowe i w dużej części opierają się o badania własne Doktoranta.

Materiał merytoryczny rozprawy doktorskiej został przedstawiony w sposób zrozumiały a zamieszczone liczne rysunki, schematy, wykresy i zdjęcia dobrze uzupełniają tok myślenia Autora.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy nasuwają się pewne drobne uwagi o charakterze bardziej formalnym niż merytorycznym (nie zmienia to jednak ogólnej pozytywnej opinii dotyczącej tej rozprawy).

- 1) Od strony 10 pojawia się słowo „pozwalające” – bardziej właściwe byłoby „umożliwiająca”.
- 2) Str. 10 w zdaniu „Elementy te muszą być wykonane z dużą tolerancją, ...”, bardziej pasowałoby określenie „... z dużą dokładnością...” – duża tolerancja kojarzy się raczej z szerokim polem tolerancji, a Doktorantowi nie o to przecież chodziło.
- 3) Rys. 1.1. w podpisie pod rysunkiem brak wpisu, że schemat dotyczy stanu przez modyfikacją wykonaną przez Doktoranta.
- 4) Str. 14, 5 akapit od góry – należałoby dodać jednoznacznie że chodzi o zróżnicowanie charakterystyk a szczegółowy ich opis przenieść do nawiasu „Jeżeli charakterystyki obu sekcji różniłyby się od siebie (posiadały rozbieżności w charakterystyce przepływu względem kąta otwarcia)....
- 5) Str. 14 do ostatniego zdania przed rysunkiem dopisać „...tak więc siła wypadkowa jest o połowę mniejsza.”
- 6) Str. 16, ostatnie zdanie należy dopisać, że chodzi o zmodyfikowany przez Doktoranta układ sterowania, np.: „Ponieważ celem pracy jest zrealizowane zmodyfikowanego układu sterowania...”.
- 7) Str. 21, 15 wiersz od góry – zamiast „...jak układ sterowania mocą, sterownie dyszą silnika czy powierzchniami sterowymi (rys. 2.5)....” , korzystniej byłoby zapisać „...jak układ sterowania mocą silników głównych, sterownie dyszą silnika czy powierzchniami sterowymi (rys. 2.5)....”
- 8) Wyjaśnienia wymagają charakterystyki częstotliwościowe (transmitancja widmowa) zamieszczone na rys. 4.18 i 4.19. Doktorant nie przedstawił informacji jakim sposobem zaprezentowane są charakterystyki (współrzędne półlogarytmiczne – wykres Blacka, czy charakterystyki logarytmiczne). Domyślam się, że wykresy te są logarytmicznymi charakterystykami częstotliwościowymi.
- 9) Na rys. 3.18 Doktorant przedstawił zmiany przebiegu momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika silnika elektrycznego – tutaj wystarczyłoby tylko jeden półokres, bo silnik elektryczny napędzający korbówód porusza się w tej konstrukcji w zakresie kątowym $+90^{\circ} \div 0 \div -90^{\circ}$, co ściśle odpowiada położeniu suwaka hydraulicznego rozdzielacza hydraulicznego.

- 10) W dysertacji brak jest opisu stanowisko do badania charakterystyk częstotliwościowych. Doktorant porównuje charakterystykę amplitudową i charakterystykę fazową (rys. 4.18 i 4.19) z badanego obiektu z modelem symulacyjnym. W jaki sposób Doktorant uzyskał doświadczalną charakterystykę częstotliwościową.
- 11) W podsumowaniu brak jest informacji, czy cel pracy został zrealizowany tj. czy zaproponowany układu sterowania położeniem tłoczyska siłownika tandemowego w postaci dwóch zsynchronizowanych serwozaworów z użyciem czterokanałowego silnika trójfazowego z magnesami trwałymi do napędu suwaka, umożliwia prawidłowe (tzn. o wysokiej dokładności odwzorowania zadanego przez pilota położenia kąтового elementów sterowania jak lotki, statecznik itp. oraz stabilne w czasie szybkich przemieszczeń ww. elementów sterowania przez pilota) zasilanie cieczą roboczą cylindrów siłownika tandemowego.

Rozprawa pod względem redakcyjnym i edycyjnym napisana jest starannie. W czasie czytania zauważyłem jednak kilka usterek, które przedstawiam poniżej:

- 1) Na str. 16 doktorant formułuje tezę pracy z której wynika, że „...istnieje możliwość zrealizowania układu sterowania położeniem tłoczyska siłownika tandemowego w postaci dwóch zsynchronizowanych serwozaworów z użyciem czterokanałowego silnika trójfazowego z magnesami trwałymi do napędu suwaka, pozwalających na prawidłowe zasilanie cieczą cylindrów siłownika tandemowego...”. Z następnego zdania wynika, że „...rozwiązanie takie obniży koszty, ułatwi i przyspieszy proces produkcji siłownika jednocześnie redukując masę całego podzespołu poprzez zastosowanie innowacyjnego podejścia dzięki technologii AM (Additive Manufacturing), druku 3D poprzez spiekanie proszku stalowego...”. Nie określono tu jednak w jaki sposób proponowane rozwiązanie obniży koszty, ułatwi i przyspieszy proces produkcji siłownika chociaż można się tego domyśleć jeśli czytelnik studiuje literaturę na ten temat. Z dotychczasowych opisów zawartych w przedłożonej rozprawie doktorskiej to jednak nie wynika. Technologia ta nie jest powszechnie znana i stosowana, więc jeżeli poruszamy temat tej technologii wykonania to należałoby bardziej szczegółowo ten problem omówić. Inna sprawa, że szczegółowe rozważania na ten temat nadawałyby się na osobny doktorat.
- 2) Na rys. 3.9 jednostką ciśnienia jest bar. Jednostką SI jest Pa.

Mimo uwag wymagających wyjaśnienia ze strony Autora, merytoryczną stronę pracy uważam za bardzo dobrą a uzyskane wyniki badań za bardzo ciekawe zarówno od strony naukowej jak i praktyki projektowej serwomechanizmów hydraulicznych.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Wyrażam opinię, że Autor pracy doktorskiej mgr inż. Jerzy SZURA zrealizował metodycznie poprawnie badania naukowe, wykazując umiejętność samodzielnego rozwiązania problemu naukowego, rozpoczynając od analizy teoretycznej z wykorzystaniem wiedzy zawartej w literaturze, przez obliczenia. Bardzo mocnym atutem pracy jest opracowanie konstrukcji i wykonanie serwomechanizmu. Jeszcze większym sukcesem doktoranta jest rozdzielanie dwóch serwomotorów z tandemu i zastąpienie wspólnego suwaka rozdzielacza dwoma oddzielnymi sterowanymi synchronicznie. Oryginalnym posunięciem konstrukcyjnym było zastosowanie przez doktoranta silnika synchronicznego czterokanałowego sterowanego częstotliwościowo (wykonanego przez firmę w której pracował wcześniej Doktorant) do oddzielnego synchronicznego sterowania dwoma suwakami napędzające mimośród, który stanowi przełożenie z ruchu obrotowego wirnika silnika na ruch podłużny suwaka rozdzielacza hydraulicznego. Dzięki takiemu rozwiązaniu Doktorant uzyskał możliwość zmiany wzmocnienia w pętli sprzężenia zwrotnego w trakcie osiągnięcia zadanego (np. przez pilota) położenia roboczego serwomechanizmu. Podniosło to dynamikę i dokładność sterowania przy zachowaniu odpowiednio wysokiego poziomu stabilności. Dotychczasowe „klasyczne” konstrukcje serwomechanizmów miały stały współczynnik wzmocnienia zależny od (stałych) parametrów konstrukcyjnych, co w pewnych okolicznościach przy gwałtownych (skokowych) ruchach drążkiem sterowym mogło skutkować oscylacjami kąta wychylenia ruchomych płaszczyzn sterowania aerodynamicznego w chwili gdy osiągał on nowy poziom ustalenia kąтового.

Pan mgr inż. Jerzy SZURA wykazał się szeroką wiedzą teoretyczną, znajomością zagadnień modelowania przepływu przez szczeliny hydrauliczne, umiejętnością zaplanowania i prowadzenia złożonych badań eksperymentalnych oraz opracowania ich wyników. Autor rozprawy przygotował i zaplanował w sposób poprawny badania, włącznie z wykonaniem specjalnych urządzeń i stanowisk badawczych z szerokim wykorzystaniem nowoczesnych metod komputeryzacji wspomagających zbieranie danych pomiarowych i ich obróbkę.

Wynik przedstawione w pracy dają podstawę do stwierdzenia, że Autor posiada ogólną widzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna, w zakresie dotyczącym

układów napędowych i ich diagnozowania oraz posiada umiejętność samodzielnego przygotowania i prowadzenia badań naukowych w tym obszarze.

Doktorant wykazał się także wysokimi zdolnościami w konstruowaniu, projektowaniu i wykonaniu układów hydro-elektrycznych z zastosowaniem technologii bezpośredniego spiekania laserowego metali (DLMS), która umożliwiła zaprojektowanie i wykonanie konstrukcji znacznie lżejszych, wytrzymalszych i bardziej skomplikowanych niż przy wykonaniu tradycyjnymi metodami.

Podsumowując wyrażam opinię, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jerzego SZURA pt. „Sterowanie i synchronizacja serwozaworów hydraulicznych do zastosowań w lotniczym silowniku tandemowym wykonanym w technologii DMLS” przygotowana pod opieką promotora Pana dr. hab. inż. Grzegorza Kopeckiego, profesora Politechniki Rzeszowskiej spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określonym Ustawą z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.z 2003 r. Nr 65, poz. 595) ze zmianami z dnia 18.03.2011 r. art. 2 w obszarze nauk technicznych, w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

Rekomenduję Radzie Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



