

Dr hab. inż. Cezary SZCZEPAŃSKI
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa
Profesor

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jerzego SZURY
p.t. „STEROWANIE I SYNCHRONIZACJA SERWOZAWORÓW
HYDRAULICZNYCH DO ZASTOSOWAŃ W LOTNICZYM SIŁOWNIKU
TANDEMOWYM WYKONANYM W TECHNOLOGII DMLS”

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jerzego Szury pod tytułem „Sterowanie i synchronizacja serwozaworów hydraulicznych do zastosowań w lotniczym siłowniku tandemowym wykonanym w technologii DMLS” została wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej z dnia 30.11.2022.

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa zawiera pięć rozdziałów, streszczenia, wykaz literatury oraz pięć dodatków. Przedstawiona została na 167 stronach, z czego 132 strony to treść części zasadniczej rozprawy. Wykaz zacytowanej literatury liczy 104 pozycje.

W początkowym, rozdziale zatytułowanym „Wstęp”, Autor przedstawił genezę badanego problemu, przedstawiając krótki rys historyczny zastosowania elementów hydraulicznych w lotniczych układach sterowania. Poruszył tu istotną nowość w tym obszarze związaną z możliwością wytwarzania elementów hydraulicznych technikami druku 3D. Stworzyło to nowe możliwości w obszarze optymalizacji konstrukcji takich elementów, a w tym ich zwielokrotniania. Z zastosowania tych technik wytwarzania wynikły jednak nowe problemy, związane z synchronizacją pracy hydraulicznych elementów sterujących siłownikami tandemowymi. Z punktu widzenia kosztów całkowitych wynikających z wprowadzania tego typu rozwiązań Autor zaproponował

jako tańsze rozwiązanie, zastosowanie dwu oddzielnych serwozaworów sterujących tym samym siłownikiem tandemowym, zamiast pojedynczego suwaka wspólnego dla dwu serwozaworów.

Z tego wynika bezpośrednio cel pracy sformułowany jako: „opracowanie metod oraz algorytmów sterowania dwoma serwozaworami pracującymi synchronicznie, z zastosowaniem silników czterokanałowych trójfazowych z magnesami trwałymi”. Silnik tandemowy badany w ramach pracy opracowany i wyprodukowany został w firmie Yasa Motors Poland, będącej miejscem wdrożenia ocenianego doktoratu.

Następnie, Autor wyjaśnił bardziej szczegółowo trudności towarzyszące niewłaściwemu dopasowaniu krawędzi suwaka rozdzielacza. W celu wyeliminowania tego problemu Autor zaproponował zastosowanie dwu niezależnych elementów sterujących silnikiem tandemowym z mikroprocesorowym układem sterowania zapewniającym odpowiednią synchronizację ich pracy. Sformułował to w postaci tezy pracy: „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”.

Ostatni podrozdział poświęcony został omówieniu struktury całej pracy i pokrótce zawartości jej poszczególnych rozdziałów.

Rozdział 2 zatytułowany „Siłowniki hydrauliczne tandemowe – analiza rozwiązań i podejść” Autor rozpoczyna od wprowadzenia w specyfikę zakresów działania i budowy systemów poprawy stateczności (Stability Augmentation Systems – SAS), układów Control Augmentation Systems (CAS) oraz układów sterowania pośredniego lotem Fly-by-Wire. Omawia je z punktu widzenia układów wykonawczych, a dokładniej mówiąc sposobów sterowania układami wykonawczymi. Przedstawia istniejące rozwiązania opisując zastosowane w nich sposoby sterowania siłownikami regulującymi położenie powierzchni sterujących samolotów lub elementów sterujących silników.

W dalszej części rozdziału Autor opisuje szczegółowo elementy układów sterowania hydraulicznych siłowników tandemowych, tj. elektrozaworów hydraulicznych i silników elektrycznych, opisując ich właściwości i parametry. Kontynuuje, opisując szczegółowo hydrauliczny siłownik tandemowy opracowany i wykonany w Yasa Motors Poland, który w dalszej części pracy będzie przedmiotem

badania, jako obiekt sterowany proponowanym układem. Przedstawiono tu także dwie wersje serwozaworu sterującego tym siłownikiem. Autor zaprojektował i wykonał całość tego serwozaworu w ramach ocenianej pracy.

Rozdział kończy szczegółowa analiza algorytmów sterowania zaworami proporcjonalnymi i serwozaworami, pod kątem ich wykorzystania w pracy. Na podstawie tej analizy sformułowano metodykę projektowania algorytmów sterowania hydraulicznymi siłownikami tandemowymi. Będzie ona zastosowana w ocenianej pracy oraz zweryfikowana i zwalidowana.

Rozdział 3, zgodnie ze swoim tytułem „Opis matematyczny serwozaworu”, zawiera model fizyczny i matematyczny badanego serwozaworu. W pracy przyjęto, że strukturę modelu tego serwozaworu tworzą: model silnika elektrycznego i model rozdzielacza, a w skład układu sterowania wchodzi regulator typu PID, który wysterowuje poszczególne fazy silnika poprzez układy generujące sygnały PWM. Na wyjściu sterownika znajduje się układ korbowo-wodzikowy przetwarzający obroty silnika na ruch posuwisto-zwrotny suwaka rozdzielacza.

Model silnika obejmuje jego właściwości elektryczne oraz mechaniczne. Wyprowadzono równania opisujące obie grupy cech i właściwości, które będą badane w dalszej części pracy. Kolejne opracowane modele odwzorowują działanie części mechanicznej zmieniającej ruch obrotowy na liniowy oraz przepływ cieczy roboczej wewnątrz rozdzielacza. Przedstawione modele zawierają wszystkie elementy niezbędne do przebadania właściwości zaprojektowanego i wykonanego w ramach pracy urządzenia.

Kolejna część rozdziału poświęcona została weryfikacji i walidacji właściwości i parametrów poszczególnych elementów opracowanego urządzenia. Rozpoczęto od przebadania opracowanego i wykonanego przez Autora silnika czterokanałowego, a w szczególności jego siły SEM oraz momentu zaczepowego. Badania wykonano na stanowiskach zaprojektowanych i wykonanych przez Autora. Przedstawiono szczegółowe wyniki oraz wnioski z nich wynikające. Badania i analiza wyników zostały przeprowadzona zgodnie ze sztuką i nie budzą żadnych wątpliwości.

Przeprowadzone badania pozytywnie zweryfikowały i zwalidowały modele elementów opracowanego serwozaworu. Przeprowadzono badania dla sterowania silnikiem za pomocą sygnałów prostokątnych i sinusoidalnych. Przeprowadzono dogłębną analizę uzyskanych wyników i na jej podstawie, ze względu na

łagodniejsze przebiegi dla sterowania sinusoidalnego przyjęto ten sposób w dalszej części pracy.

Rozdział 4 „Sterowanie zaworami hydraulicznymi” poświęcony jest analizie i syntezie praw sterowania pojedynczym serwozaworem oraz synchronizacji obu zaworów sterujących hydraulicznym siłownikiem tandemowym. Jak podkreśla to Autor, jednym z kluczowych kryteriów doboru praw sterowania oraz metod ich syntezy jest możliwość „sprawnej implementacji zastosowanych algorytmów w warunkach przemysłowych”. Szczególnie w urządzeniach lotniczych ma to duże znaczenie, gdyż zgodnie z obecnymi przepisami żadne urządzenie istotne dla bezpieczeństwa lotu nie może zawierać oprogramowania indeterministycznego, a więc także wykorzystującego metody sztucznej inteligencji. Stąd też słuszna decyzja by oprzeć sterowanie siłownikiem tandemowym na regulatorze typu PID. Do oceny opracowanych układów sterowania Autor zastosował badanie reakcji na wymuszenia skokowe w zakresie od 25% do 100% położenia suwaka rozdzielacza, ocenę charakterystyk Bodego oraz zaproponowane przez niego kwadratowo-całkowe funkcjonały jakości.

Do badań przyjęto cztery typy algorytmów sterowania bazujących na regulatorze PID:

- regulator pozycyjno-prędkościowy,
- regulator pozycyjno-prędkościowy ze zmiennymi współczynnikami wzmocnienia,
- regulator PIDD²,
- sterowanie adaptacyjne według modelu.

Dla regulatora pozycyjno-prędkościowego przedstawione wyniki badań potwierdzają prawidłowość wyboru takiego regulatora, a uzyskane wyniki są zbliżone do charakterystyk podobnych regulatorów oferowanych na rynku. Dodatkowo Autor sprawdził możliwość funkcjonowania układu w warunkach awaryjnych, tj. braku zasilania jednego lub dwu kanałów silnika czterokanałowego. Uzyskane wyniki badań pozwoliły pozytywnie zwalidować zastosowane modele elementów zaprojektowanego układu sterowania, co pozwoli zastosować je do projektowania nowych rozwiązań sterowników.

W regulatorze pozycyjno-prędkościowym ze zmiennymi współczynnikami wzmocnienia Autor wprowadził zmienność współczynnika wzmocnienia, dzięki czemu uzyskał zwiększenie zakresu przenoszonych częstotliwości w stosunku do

poprzedniego rozwiązania z około 80Hz do około 110Hz. Potwierdził też jakościowo poprawę właściwości dynamicznych obiektu z układem sterowania bez znaczącej komplikacji struktury układu.

Regulator typu PID² zastosowany w ocenianych badaniach jest modyfikacją regulatora poprzedniego typu polegającą na dodaniu w wewnętrznej pętli sterowania pochodnej drugiego rzędu położenia suwaka. W celu wyeliminowania ewentualnych wzmocnień szumów Autor zastosował w układzie nieliniowy filtr medianowy (nonlinear median filter - NMF). Przeprowadzone badania zarówno symulacyjne jak i na rzeczywistym obiekcie potwierdziły wyższość tego rozwiązania nad poprzednio przeanalizowanymi. Autor przyjął to rozwiązanie do dalszych prac nad prototypem układu sterowania siłownikiem tandemowym. Oceny tej dokonano na podstawie uzyskanych wartości funkcjonałów jakości.

W dalszej części rozdziału Autor podjął istotne z punktu widzenia praktyki produkcyjnej zagadnienie, a mianowicie możliwość automatycznego strojenia układów sterowania siłownikami tandemowymi. Konieczność takiego strojenia wynika z tolerancji wykonania poszczególnych elementów układu sterującego, w tym przede wszystkim elementów krawędzi rozdzielaczy hydraulicznych. Autor zaproponował zastosowanie do tego celu algorytmu sterowania według modelu MRAC (Model Reference Adaptive Control). Następnie sformułował założenia do konstrukcji układu, jego strukturę oraz model sterowanego obiektu. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych potwierdziły poprawność założeń, przyjętego modelu oraz skuteczność dostosowania wartości współczynników wzmocnień do konkretnego układu sterowania. Pozwoli to na zastosowanie zaproponowanej metody do strojenia opracowanego regulatora w czasie produkcji serwozaworów do sterowania hydraulicznych siłowników tandemowych.

W kolejnym fragmencie tego rozdziału podjęto kluczowe dla pracy zagadnienie synchronizacji pracy dwu serwozaworów sterowanych przedstawionymi poprzednio metodami. Dążenie do równomiernej pracy obu serwozaworów wynika z konieczności zapewnienia takich samych przepływów cieczy roboczej w obu układach hydraulicznego siłownika tandemowego. Do realizacji tego postulatu Autor przyjął metodę leader-follower, w której jednej z serwozaworów (follower) nadąża za drugim (leader). Sprowadziło to zadanie synchronizacji obu serwozaworów do zagadnienia analogicznego do sterowania według modelu. Jako regulator synchronizujący pracę obu serwomechanizmów Autor przyjął regulator typu PID.

Zaproponował też przyjęcie błędu pozycji suwaków obu regulatorów nie większego niż 1,5% jako sukcesu synchronizacji serwozaworów.

Badania symulacyjne przeprowadzono, tak jak w poprzedniej części pracy, dla wymuszeń skokowych od 25% do 100% ruchu suwaka rozdzielacza. Na Rys.4.30 przedstawiono wyniki symulacji dla wymuszenia sinusoidalnego wskazujące, że nawet bez zastosowania regulatora synchronizacji błąd synchronizacji nie przekracza $\pm 1,5\%$. Wyniki dla pozostałych wymuszeń umieszczone w dodatku D wskazują jednak na nieskuteczność zaproponowanej metody, gdyż dla wymuszenia 50% błąd wynosi około $\pm 3\%$, dla wymuszenia 75% - do $\pm 10\%$, a dla wymuszenia 100% ponad $\pm 10\%$. W tym świetle zupełnie niezrozumiałe i błędne jest stwierdzenie Autora ze strony 114, wiersz 4 od góry, że „Przedstawione wyniki jednoznacznie pokazują poprawność działania zastosowanego układu synchronizacji”. W dalszym ciągu rozdziału Autor proponuje jednak zmodyfikowanie zaproponowanej metody synchronizacji pracy obu serwozaworów poprzez dodanie drugiej pochodnej uchybu (różnicy położenia suwaków) oraz dwukrotne zwiększenie częstości próbkowania tego sygnału i prowadzonych obliczeń regulatora synchronizującego. Zaproponowane zmiany pozwoliły uzyskać synchronizację pracy obu serwozaworów na poziomie błędów przyjętego uchybu od 0,4% dla wymuszenia 50% do 0,8% dla wymuszenia 100%. Co istotniejsze Autor przedstawił tu dodatkowe kryterium jakości synchronizacji – wartość przepływów cieczy roboczej w obu częściach układu siłownika tandemowego. Zaproponowana zmodyfikowana metoda synchronizacji pozwoliła zapewnić utrzymanie równomierności tych przepływów na poziomie do 0,4%, co jest wynikiem wystarczającym w praktyce do uzyskania równomiernej pracy takiego siłownika. Autor przedstawił także wyniki symulacji synchronizacji pracy serwozaworów dla przypadku uszkodzenia dwu kanałów silnika sterownika. Pokazały one pogorszenie się błędu synchronizacji do poziomu 0,6%, co jest w zupełności wystarczające do utrzymania prawidłowej pracy zespołu siłownika tandemowego.

Biorąc pod uwagę uzyskane rezultaty badań symulacyjnych należałoby się zastanowić nad przyjęciem kryterium równomierności przepływów w obu częściach siłownika tandemowego jako wskaźnika jakości synchronizacji pracy regulatorów hydraulicznych siłowników tandemowych produkowanych w firmie wdrażającej wyniki doktoratu. Oczywiście jest to uwarunkowane możliwością pomiaru tych przepływów z odpowiednią dokładnością.

Rozdział 5 zatytułowany „Podsumowanie” zawiera nadzwyczaj zwarte podsumowanie przeprowadzonych prac konstrukcyjnych nad układami sterowania siłownikiem tandemowym, ich badań oraz uzyskanych wyników. Powtórzono tu ogólne wnioski przedstawione w poszczególnych rozdziałach pracy.

Autor dodał tu bardzo ciekawe propozycje dalszych badań i prac rozwojowych, wynikających w tej pracy. Pośród nich znalazło się opracowanie metod wykrywania różnego typu awarii w układzie sterowania oraz metod rekonfiguracji układu sterowania po wystąpieniu takich awarii.

W tym miejscu podsumowując zawartość merytoryczną, należy stwierdzić, że autor zrealizował w pełni założone badania osiągając planowane cele naukowe.

Pod względem redaktorskim, praca została napisana nadzwyczaj zwięźle. Wymaga to uważnej jej lektury, aby nadażyć za myślą Autora. W początkowej części pracy (Rozdziały 1 i 2) pojawiają się liczne błędy gramatyczne i kilka drobnych redakcyjnych, które nie zaburzają zrozumienia myśli autora oraz nie umniejszają wysokiej oceny merytorycznej przedstawionej mi do oceny rozprawy doktorskiej. Błąd logiczny ze strony 10 wiersz 2 od dołu, gdzie Autor pisze o wykonaniu elementów z „dużą tolerancją” a z treści wynika coś wręcz przeciwnego, a zaraz po tym pojawiające się pojęcie „szczególna dokładność i klasa powierzchni” należy potraktować jako jednorazowe niedopatrzenie redakcyjne.

W sumie, oceniam poziom pracy jako spełniający w całym zakresie wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi, w szczególności dla doktoratów wdrożeniowych. Autor w pełni wykazał się umiejętnością formułowania celu naukowego badań, znajomością metodyki prowadzenia badań naukowych oraz zdolnością do wyciągania wniosków, popartą znajomością wiedzy w obszarach objętych przedstawioną rozprawą.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie autora do publicznej obrony przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej.



Dr hab. inż. Cezary Szczepański

Profesor Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa

