

dr hab. inż. Robert Głębocki, prof. PW  
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
Politechnika Warszawska

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jerzy Szura  
**Sterowanie i synchronizacja serwozaworów hydraulicznych do zastosowań w lotniczym siłowniku  
tandemowym wykonanym w technologii DMLS**

wykonanej na Politechnice Rzeszowskiej

promotor pracy dr hab. inż. Grzegorz Kopecki prof. PRz

### **Podstawa opracowania**

Podstawę opracowania stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 30.11.2022 o powołaniu recenzentów rozprawy doktorskiej mgr inż. Jerzego Szury i dołączona do niego „Sterowanie i synchronizacja serwozaworów hydraulicznych do zastosowań w lotniczym siłowniku tandemowym wykonanym w technologii DMLS”. Promotorem jest dr hab. inż. Grzegorz Kopecki, prof. PRz.

### **1. CEL NAUKOWY I PRZEDMIOT BADAŃ ROZPRAWY**

Praca dotyczy zagadnień związanych z hydraulicznymi układami wykonawczymi sterowania stosowanymi w lotnictwie. Wraz z pojawieniem się nowych możliwości wykonawczych dzięki zastosowaniu druku 3D konstrukcje te mogą znacząco poprawić swoje możliwości. Nowe technologie wykonania pozwalają na poprawę parametrów masowych bardziej skomplikowanych konstrukcji układów hydraulicznych. Umożliwia wykonywanie skomplikowanych kształtów wewnętrznych oraz eliminację zbędnych mas przy jednoczesnym zachowaniu wysokich wymagań niezawodnościowych. Niesie to ze sobą nowe wyzwania dla konstruktorów. Badania podjęte w pracy przez doktoranta są potrzebne i ich podjęcie było uzasadnione. W swej dysertacji doktorant zajął się problematyką sterowania podwójnym zaworem hydraulicznym wykonanym w technologii SLM dla tendemowego siłownika hydraulicznego. Technologia wytwarzania przyrostowego elementów hydraulicznych, oprócz nowych możliwości wykonawczych, niesie ze sobą również nowe wyzwania związane z zapewnieniem odpowiednich



dokładności wykonania oraz odpowiedniej wytrzymałości konstrukcji. Pracę uważam za ciekawą i wartościową poświęconą szybko rozwijającej się dziedzinie. Autor przedstawił problem efektywnego sterowania wykonanymi w ten sposób konstrukcjami hydraulicznymi.

Jako cel pracy autor deklaruje „opracowanie metod oraz algorytmów sterowania dwoma serwowzorami pracującymi synchronicznie, z zastosowaniem silników czterokanałowych”. W swej pracy doktorant zaprezentował siłownik tandemowy wykonany w firmie Yasa Motors Poland. Opisywany i badany przez autora dysertacji układ sterowania jest oparty na tymże urządzeniu. Aby efektywnie wykorzystać nowe możliwości technologiczne doktorant zaproponował rozwiązanie polegające na zastosowaniu dwóch osobnych serwowzorów z zastosowaniem algorytmu synchronizatora, zapewniającego prawidłową pracę całego zespołu siłownika tandemowego. Rozprawa poświęcona jest realizacji układu sterowania stąd część pracy poświęcona jest algorytmom sterowania i zagadnieniu synchronizacji serwowzorów. Praca jest interesująca z wartościowym materiałem doświadczalnym oraz porównaniem z wynikami obliczeń i symulacji.

Autor precyzuje tezę swej pracy jako „Istnieje możliwość zrealizowania układu sterowania położeniem tłoczyska siłownika tandemowego w postaci dwóch zsynchronizowanych serwowzorów z użyciem czterokanałowego silnika trójfazowego z magnesami trwałymi do napędu suwaka, pozwalających na prawidłowe zasilanie cieczą cylindrów siłownika tandemowego”. Teza jest sformułowana prawidłowo. Doktorant prawidłowo i w sposób logiczny prowadzi narrację pracy udowadniając kolejnymi wynikami swej pracy jej prawdziwość.

## **2. STRUKTURA I ZAKRES PRACY**

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów wliczając w to wstęp i podsumowanie. Ponadto posiada wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń oraz bibliografię. Dołączono również pięć dodatków zawierających dodatkowe informacje oraz wyniki badań których nie wykorzystano w pracy. Tytuły rozdziałów to kolejno: 1. Wstęp, 2. Siłowniki hydrauliczne tandemowe - analiza rozwiązań i podejść, 3. Opis matematyczny serwowzoru, 4. Sterowanie zaworami hydraulicznymi 5 podsumowanie. Autor powołuje się na 104 pozycje literaturowe.

Struktura pracy jest prawidłowa. Zakres prowadzonych w pracy badań przedstawiony jest logicznie. Autor najpierw omawia zagadnienia związane z teoretycznymi aspektami problemu. Błędem wydaje mi się przesunięcie znacznej części wyników symulacji i eksperymentów do dodatków. W ten sposób zubożono wyniki przedstawione w rozdziale 4. Jednocześnie w dodatkach wyniki nie są komentowane i poddawane analizom. Są pozostawione bez komentarza co stawia pod znakiem zapytania sens ich zamieszczenia. Przedstawiane samych wyników bez ich analizy nie jest dobrą praktyką przy pisaniu prac naukowych. Niemniej jednak wyniki przedstawione w rozdziale 4 są wystarczające dla narracji pracy.



Praca jest przejrzysta i nie stwarza trudności w interpretacji i zrozumieniu przeprowadzonych przez autora badań i analiz. Rozprawa liczy 132 strony a wraz z dodatkami, stanowiącymi jej istotny element 167 stron. Jej objętość jest typowa dla średniej wielkości rozpraw doktorskich. Jest wykonana starannie i dobrze edycyjnie. Rysunki i wzory są czytelne. Zamieszczony na początku pracy spis skrótów i oznaczeń ułatwia zapoznanie się z jej treścią. Warto podkreślić staranne przygotowanie pracy przez doktoranta.

### 3. OCENA WYKONANYCH BADAŃ

We wstępie Autor przedstawia przesłanki, które skłoniły go do podjęcia tematu, problem który będzie badał i rozwiązywał. Przedstawił w skrócie problemy i wyzwania związane z konstrukcją i sterowaniem lotniczych układów hydraulicznych. Następnie przedstawił wyniki własnych prac w tym symulacji i eksperymentów.

Rozdział 1 to „Wstęp”. Przedstawiono w nim opis problemu oraz cel i tezę pracy.

W rozdziale 2. „*Siłowniki hydrauliczne tandemowe - analiza rozwiązań i podejść*” autor przedstawia przegląd rozwiązań i konstrukcji siłowników, zaworów, serwozaworów i rozdzielaczy hydraulicznych stosowanych w lotnictwie. Doktorant dość szeroko analizuje dostępną wiedzę literaturową. Należy zauważyć dobrą znajomość publikacji krajowych. Przedstawiono historię rozwoju i obecny podział rozwiązań lotniczych systemów sterowania. Następnie doktorant rozwój i przegląd typów elektrozaworów hydraulicznych. Zwracając uwagę na dynamikę ich pracy. Kolejna część rozdziału poświęcona jest silnikom elektrycznym stosowanym w rozwiązaniach serwozaworów. Następnie doktorant przedstawia siłownik tandemowy firmy Yasa Poland będący w dalszej części pracy obiektem badań i modernizacji. Analizuje jego budowę i proponowane przez siebie zmiany. Ostatnią część rozdziału 2 autor poświęca na zagadnienia związane algorytmami sterowania serwozaworami. Z analiz wynika wybór zmodyfikowanej kaskadowej regulacji PID z dodatkową drugą pochodną w prawie sterowania oraz odpowiednią filtracją. Zajmuje się również synchronizacją serwozaworów w związku z zaproponowanym rozwiązaniem tandemowym.

Rozdział 3. „*Opis matematyczny serwozaworu*”. W rozdziale tym doktorant opisał model matematyczny rozdzielacza serwozaworu oraz silnika czterokanałowego trójfazowego na magnesach trwałych. Autor przedstawił model matematyczny silnika sterującego serwozaworem a następnie model samego zaworu. Modele są wyprowadzone prawidłowo i dobrze opisane. Po wyprowadzeniu modelu przeprowadzono jego weryfikację. Przebadano siłę elektromotoryczną silnika czterokanałowego sterującego zaworem oraz oszacowano moment zaczepowy. Symulacje przeprowadzono dla przypadków sterowania przebiegiem prostokątnym oraz sinusoidalnym. Zarówno przedstawienie modelu matematycznego jak i przykłady weryfikujące go są przeprowadzone prawidłowo i prawidłowo przeanalizowano. Rozdział dobrze jasno napisany, uzupełniony o odpowiednie rysunki.

W rozdziale 4. „*Sterowanie zaworami hydraulicznymi*” autor przedstawia zaprojektowany przez siebie algorytm sterowania serwomechanizmem. Rozdział ten jest



najważniejszym rozdziałem pracy i pokazuje badania przeprowadzone przez doktoranta. Wykorzystuje do tego celu zrealizowany układ sterowania oparty o modyfikowane regulatory PID. Doktorant badał możliwości zastosowania regulatora pozycyjno-prędkościowego, regulatora pozycyjno-prędkościowego ze zmiennymi współczynnikami wzmocnień oraz regulator PID z dodatkową pochodną drugiego rzędu oraz filtrem dolnoprzepustowym. Układ był najpierw badany w oparciu o model symulacyjny a następnie badania dotyczą już rzeczywistego urządzenia. Doktorant przeanalizował w dalszej części pracy możliwość zastosowania algorytmu automatycznego strojenia regulatora na bazie sterowania adaptacyjnego według modelu MRAC. Warto tu zauważyć dobre przygotowanie teoretyczne i praktyczne autora pracy. W dalszej części doktorant opracował również algorytmy synchronizacji dwóch serwozaworów. Po przeprowadzeniu badań symulacyjnych oraz na rzeczywistym obiekcie dokonał modyfikacji regulatora synchronizacji poprawiając jej jakość przy sterowaniu siłownikiem tandemowym. Opracował również metodykę doboru współczynników wzmocnienia wspomnianego układu. Po przeanalizowaniu uzyskanych wyników autor wykazał możliwość zrealizowania układu sterowania położeniem tłoczyska siłownika tandemowego w postaci dwóch zsynchronizowanych serwozaworów z użyciem czterokanałowego silnika trójfazowego z magnesami trwałymi do napędu rozdzielacza. Czym udowodnił tezę postawioną w swojej pracy. Rozdział jest dobrze opisany z prawidłowymi analizami. Analizy są jednak dość lakoniczne i powinny być bardziej pogłębione.

W rozdziale 5. „Podsumowanie” doktorant przedstawił wnioski z przeprowadzonych prac. Wskazał jej najważniejsze osiągnięcia oraz wykonane zadania jak: przygotowanie modelu matematycznego serwozaworu, syntezę algorytmów sterowania pojedynczym serwozaworem, układ synchronizacji dwóch mechanizmów serwozaworów, algorytm umożliwiający dostrojenie regulatora synchronizującego oraz badania symulacyjne i na rzeczywistym obiekcie. Przedstawił również proponowane dalsze kierunki rozwoju prac badawczo wdrożeniowych w opisywanym zagadnieniu.

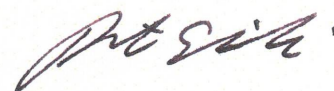
Dodatki. Oprócz parametrów elektrycznych elementów systemu zawierają dodatkowe wyniki badań przedstawionych w dysertacji. Dwa z nich dotyczą badań silnika, kolejne synchronizacji pracy dwóch serwozaworów z regulatorem synchronizacji. Zawierają one część badań symulacyjnych i na rzeczywistym obiekcie wykonanych przez doktoranta. Są uzupełnieniem materiału zawartego w samej dysertacji w rozdziale 4. Zawierają jednak jedynie zapisy z badań bez analiz i komentarzy. Są materiałem wartościowym jednak taka forma przedstawienia wyników prac nie jest najlepsza. Praca zyskałaby gdyby wyniki znalazły się w samej dysertacji wraz z ich analizami lub przynajmniej zostały opisane w dodatkach.



#### 4. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując ocenę rozprawy, stwierdzam, że przedmiot oraz zakres i sposób wykonania badań w pracy odpowiadają wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim. Pracę oceniam jako bardzo dobrą. Stanowi ona wartościowy wkład do rozwoju technologii lotniczych układów hydraulicznych. Mimo wspomnianych wyżej uwag do pracy uważam, że Autor rozprawy wykazał właściwy poziom wiedzy teoretycznej w zakresie tematyki rozprawy, umiejętność przeprowadzenia badań i gromadzenia potrzebnych do analizy ich wyników danych, prowadzenia badań eksperymentalnych oraz oceny ich wyników.

Uważam więc, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jerzego Szury „*Sterowanie i synchronizacja serwozaworów hydraulicznych do zastosowań w lotniczym siłowniku tandemowym wykonanym w technologii DMLS*” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę „o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 r (Dz. U. nr 65, poz. 595. z późn. zm.) oraz wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.



/Robert Głębocki/