

Dr hab. inż. Piotr Kohut, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Robotyki i Mechatroniki
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków, 28-04-2023 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Warzochy
pt. *„Modelowanie i badania elektro-hydraulicznego siłownika do zastosowań lotniczych
wykonanego w technologii przyrostowej DMLS”*

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Paweł Rzucidło, prof. PRz

Recenzja została przygotowana na zlecenie rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej, która na posiedzeniu w dniu 30 listopada 2022r. powołała mnie na recenzenta niniejszej rozprawy doktorskiej, na podstawie pisma z dnia 30 listopada 2022r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny dr hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz

1. Wybór tematu, cel i zakres pracy

Recenzowana praca została napisana w języku polskim i obejmuje zagadnienia związane z projektowaniem, modelowaniem matematycznym i symulacjami numerycznymi oraz badaniami eksperymentalnymi urządzeń wykonawczych wykorzystywanych w zaawansowanych systemach pośredniego sterowania lotem. Porusza aktualne i istotne zagadnienia związane z przemysłem lotniczym dotyczące redukcji masy i zmniejszenia liczby części wykorzystywanych w układach napędów powierzchni sterowych, poprzez zastosowanie technologii przyrostowych.

Praca obejmuje nie tylko obszar modelowania i symulacji numerycznych zaawansowanych systemów lotniczych, ale i zagadnienia złożonych symulacji lotu, sprzęgających modele różnych podsystemów i systemów głównych.

W pracy wykonano przegląd istniejących siłowników wykonawczych stosowanych w pośrednim systemie sterowania lotem, omówiono typowe rozwiązania redundancji i zaproponowano modele matematyczne zintegrowanych układów elektro-

hydraulicznych, a następnie przeprowadzono symulacje numeryczne. Autor obrał wymagający cel, którym było opracowanie prototypu kompletnego serwośiownika elektrohydraulicznego wykonanego w technologii druku 3D oraz jego dalsze wdrożenie. Uzyskane rezultaty z badań numerycznych porównano z wynikami uzyskanymi w trakcie eksperymentów badawczych na wykonanym prototypie urządzenia oraz z ogólnie dostępnymi wynikami badań dla istniejących urządzeń na rynku.

Praca ma charakter badawczo-naukowy, zawiera eksperymentalne rozwiązanie postawionej tezy badawczej. Treść rozprawy ze względu na swój charakter obejmuje szereg zagadnień z obszaru dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska zawiera łącznie 175 stron podzielonych na sześć rozdziałów podstawowych oraz dwa dodatkowe, spis bibliografii liczący 107 pozycji, wykaz akronimów i ważniejszych oznaczeń oraz listy rysunków i opracowanych modeli symulacyjnych przedstawionych w dodatku B.

W rozdziale pierwszym Autor zaprezentował matematyczny opis ruchu statku powietrznego dla typowych stanów lotu, omówił system pośredniego sterowania lotem i na przykładzie istniejących rozwiązań samolotu Airbus A330 przedstawił jego działanie. W dalszej części, w odniesieniu do możliwości praktycznego zastosowania w pośrednim systemie sterowania, scharakteryzowano oraz wskazano wady i zalety siłowników elektrohydraulicznych, elektrohydrostatycznych i elektromechanicznych.

W rozdziale drugim zostały omówione metody redundancji w systemach sterowania lotem. Zaprezentowano poziomy bezpieczeństwa dla głównych systemów samolotów pasażerskich, omówiono podstawowe rodzaje redundancji oraz zaprezentowano rozwiązania stosowane w projektowaniu siłowników układów sterowania lotem z uwzględnieniem układów elektrycznych, hydraulicznych i mechanicznych.

W rozdziale trzecim Doktorant wskazał cele pracy, przedstawił problem naukowy oraz jego oryginalność. Postawiona została również teza pracy. W rozdziale tym wskazane zostały opracowane publikacje naukowe oraz uzyskane patenty potwierdzające oryginalny wkład autora w dziedzinę nauki, potwierdzające także oryginalność opracowanego, w technologii druku 3D, kompletnego siłownika elektrohydraulicznego.

Należy podkreślić, iż zaproponowana metoda wytwarzania ultralekkich korpusów zaworów do zastosowań lotniczych została zabezpieczona prawnie za

pomocą uzyskanego patentu PL227484. Do zastosowań lotniczych Autor również opatentował wielokanałowy bezszczotkowy silnik osiowo-strumieniowy PL234702.

Rozdział czwarty zawiera, opisane przez Autora w publikacjach, wyniki badań dotyczące wykorzystania materiałów wykonanych ze stali maraging w technologii przyrostowych (SLM/DMLS) do wytwarzania lekkich i wytrzymałych elementów (elektrohydraulicznych siłowników) lotniczych stosowanych w pośrednim systemie sterowania. Uzyskane rezultaty obejmowały wyniki badań ze statycznej próby rozciągania oraz wyniki badań zmęczeniowych. Część badań przeprowadzono zgodnie z normami: PN-EN ISO 6892-1:2016-09 w przypadku statycznej próby rozciągania oraz zmęczeniowe jednostronnego rozciągania zgodnie z ASTM E466-15.

Przedstawione przez Autora ważne wnioski z przeprowadzonych badań wskazują, że stal maraging 1.2709 po spiekaniu laserowym charakteryzuje się zbliżoną wytrzymałością na rozciąganie do stali maraging 18Ni1400, a wytrzymałość zmęczeniowa jest niższa o około 16% (w porównaniu do najsłabszych jej odpowiedników). Granica zmęczeniowa jest uzależniona od kierunku występowania obciążenia względem kierunku wytwarzania części podczas technologii spiekania laserowego. Przeprowadzone badania wskazują, że niższa wytrzymałość części na obciążenia występuje na kierunku równoległym do przyrostu nakładanej i przetapianej warstwy sproszkowanego metalu, stąd zaleca się aby projektowanie części wytwarzanych w technologii przyrostowej odbywało się z uwzględnieniem procesu produkcyjnego.

W rozdziale tym również zaprezentowano i omówiono opracowany w technologii wytwarzania przyrostowego SLM/DMLS siłownik elektrohydrauliczny, który wyprodukowany został w firmie Yasa.

W rozdziale piątym, w oparciu o zaproponowany projekt serwozaworu i siłownika, przedstawiono modele matematyczne zintegrowanych układów elektro-hydraulicznych, które obejmowały:

- a) model trójfazowego silnika zastosowanego do napędu serwozaworów o quadropleksowej redundancji uzwojeń, dla którego w środowisku Matlab/Simulink wykonano symulacje zmiany prądów i napięć w uzwojeniach napędu serwozaworu przy wymuszeniu skokowym,

- b) model przepływu w serwozaworze sterującym, gdzie z wykorzystaniem metody CFD przeprowadzono analizę przepływu przez port sterujący serwozaworu i występujący spadek ciśnienia,
- c) modelowanie przecieku wewnętrznego występującego w serwozaworze sterującym. W wyniku przeprowadzonych analiz uzyskano charakterystykę przecieku wewnętrznego oraz charakterystykę modelu wzmocnienia ciśnienia w serwozaworze sterującym,
- d) modelowanie i analizę sił działających na suwak w serwozaworze podczas przepływu. W wyniku analiz wyznaczono charakterystykę przedstawiającą zależność sił działających na suwak rozdzielacza w funkcji przepływu,
- e) model kompletnego serwośiłownika w konfiguracji tandemowej, który zaimplementowano środowisku Matlab/Simulink i wyznaczono odpowiedzi skokowe oraz charakterystyki amplitudowo-fazowe dla serwozaworu i serwośiłownika dla szerokiego pasma sygnałów wymuszających.

W rozdziale szóstym przedstawiono część eksperymentalną pracy. Autor opisał stanowisko badawcze, na którym przeprowadzono testy serwozaworów sterujących oraz testy kompletnego siłownika. W ramach przeprowadzonych testów, dla serwozaworu sterującego uzyskano charakterystykę przepływu przez port sterujący przy stałym ciśnieniu zasilania. W oparciu o pomiar prądu określono siły działające na suwak w funkcji przepływu. Wykonano pomiar dopasowania krawędzi suwaka do otworów portów sterujących w tulei serwozaworu oraz wykreślono histerezę serwozaworu. Dla stałej wartości różnicy ciśnienia wyznaczono przeciek wewnętrzny w przyjętym zakresie zmiany pozycji suwaka. Wyznaczono również charakterystykę wzmocnienia ciśnienia na portach sterujących serwozaworu w zależności od położenia suwaka. Dla serwozaworu oraz dla kompletnego siłownika wyznaczono odpowiedzi skokowe oraz charakterystyki amplitudowo-fazowe. Dla kompletnego siłownika przeprowadzono również testy odpowiedzi siłownika na wymuszenia w postaci sygnałów sinusoidalnych o różnych amplitudach i częstotliwościach.

Uzyskane wyniki, w końcowej części rozdziału, zostały poddane pod dyskusję, szczególnie w odniesieniu do otrzymanych wyników z części analitycznej porównane z wynikami badań aktualnie produkowanych siłowników elektrohydraulicznych, elektrohydrostatycznych i elektromechanicznych.

Autor wyjaśnił niewielkie różnice w uzyskanych wynikach analitycznych oraz eksperymentalnych, szczególnie w odpowiedziach skokowych i opóźnieniu fazowym serwozaworu. Autor podkreślił także, że uzyskane wyniki dla wykonanego prototypu siłownika, w porównaniu do istniejących na rynku siłowników są w pełni zadawalające. Opracowany siłownik charakteryzuje się mniejszym spadkiem amplitudy sygnału wyjściowego do sygnału wejściowego oraz mniejszym przesunięciem fazowym. Na podstawie uzyskanych wyników została potwierdzona postawiona w pracy teza.

W podsumowaniu przedstawiono wnioski oraz dalsze kierunki prac. Kolejny rozdział stanowi spis pozycji bibliograficznych wykorzystanych w pracy. Dodatek A i B zawiera dane liczbowe oraz wybrane modele matematyczne opracowane w postaci schematów blokowych w środowisku Matlab/Simulink. Praca zakończona jest streszczeniem.

W skład cytowanej literatury obejmującej 107 pozycji, wchodzi zarówno książki, podręczniki, raporty techniczne, jak i akty prawne, normy, a także publikacje zagraniczne oraz krajowe. Cytowane publikacje są w przeważającej większości anglojęzyczne, część z nich pochodzi o ostatnich 5 lat, co dowodzi aktualności pracy i jednocześnie znajomości literatury przedmiotu przez Autora. Wyniki swoich prac Doktorant opublikował w trzech publikacjach, z czego dwie stanowią publikacje w czasopiśmie z listy JCR, jedna zamieszczona w materiałach konferencyjnych oraz w dwóch złożonych i przyznanych patentach.

Nowatorstwo i oryginalność pracy dotyczy opracowania modelu, zaprojektowania oraz wykonania w technologii przyrostowej SLM/DMLS prototypu serwośiownika elektrohydraulicznego dedykowanego systemom pośredniego sterownia lotem. Opatentowana przez Autora metoda wytwarzania ultralekkich korpusów zaworów umożliwiła wykonanie zintegrowanych z zaworem struktur wsporczych, w celu wyeliminowania obróbki króćców wejściowych otworów rozdzielacza. W oparciu o technologie druku 3D wykonano wewnętrzne kanały przepływowe o zmiennych polach przekrojów oraz umieszczono dwa hydrauliczne serwozawory wraz z tulejami rozdzielaczy sterujących w centralnej obudowie pomiędzy tłoczkami. Przedstawione rozwiązanie stanowi o innowacyjności wynalazku i potwierdza nowatorstwo i oryginalność pracy. Projekt opracowanego siłownika charakteryzuje się małą masą oraz wysokim poziomem integracji systemów wewnętrznych. Siłownik FBW został

wyprodukowany technologii SLM/DMLS w firmie Yasa. Opracowany został w taki sposób aby osiągnąć najwyższy poziom bezpieczeństwa oraz uprościć metody wykrywania awarii. Zastosowano w nim dwa serwozawory o napędzie bezpośrednim sterujące dwoma tłoczyskami sprzęgniętymi w konfiguracji tandemowej, oraz trójfazowy bezszczotkowy silnik elektryczny o poczwórnej redundancji uzwojeń jako napęd rozdzielacza.

Przez Autora opatentowany został również wielokanałowy bezszczotkowy silnik osiowo-strumieniowy do zastosowań lotniczych, który zdaniem Autora również może być wykorzystany do napędu suwaka w serwozaworach.

2. Poprawność metodyki badań i analiza wyników

W pracy przedstawiono modele matematyczne, symulacyjne numeryczne oraz badania doświadczalne. Udowodniono słuszność zaproponowanego podejścia oraz, co ważne jego praktyczną użyteczność. Zastosowana metodyka badań jest prawidłowa, analiza wyników badań przeprowadzona została w sposób właściwy świadcząc o dużym zasobie wiedzy, inwencji twórczej i rzetelności naukowej autora. Autor wykazał się dobrym opanowaniem aparatu badawczego zarówno w obszarze badań eksperymentalnych jak i symulacji numerycznych. Pozwoliło to na uzyskanie wartościowych wyników i na ich podstawie sformułować właściwe wnioski oraz zrealizować założony cel pracy.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Należy podkreślić, że rozprawa doktorska jest przygotowana w staranny, przemyślany i uporządkowany sposób – zawiera jednak pewne błędy typograficzne oraz edytorskie. Układ pracy jest poprawny. Treści dysertacji zostały logicznie podzielone na poszczególne rozdziały pracy. Układ i zakres poszczególnych rozdziałów, podrozdziałów i sekcji nie budzi wątpliwości recenzenta. Rozdziały, podrozdziały, sekcje, stopki, nagłówki utrzymane zostały w tej samej konwencji. Rysunki przygotowane są z dbałością. Przedstawienie wyników badań, schematów oraz urządzeń jest dokładne. Uwagi nasuwające się po lekturze pracy mają charakter ogólny i redakcyjny – w niewielkim stopniu utrudniają one lekturę lub prowadzą do wątpliwości. Zarówno

powyżej wymienione, jak i inne redakcyjne błędy nie umniejszają jednak merytorycznej wartości pracy i nie wpływają na ogólną wysoką ocenę jej zawartości.

Poniżej zamieszczono uwagi do recenzowanej pracy:

1) Rozdział 2,

1.1 (Str.53), Ciąg wyrazów w zdaniu: błędu/usterki/awarii, powinien zostać przeredagowany, np.: błędu , usterki lub awarii.

1.2 (Str.75), Podobne uwagi dotyczą wyrażen: zrealizowane/zaimplementowane

2) Rozdział 4

1.1 (Str. 71-73), W treści brak opisu (zdefiniowania) wielu oznaczeń, zawartych pierwszym wierszu, w tabelach Tab.4.1-4.3.

1.2 (Str. 78), Ostatni akapit, ostatni wyraz, powinien mieć brzmienie: 'wewnętrzne'.

3) Rozdział 5

1.3 (&5.1, rys.5.2), Brak wyjaśnienia oznaczeń : T_{max} , B.

1.4 Zbyt ogólne omówienie uzyskanych wyników z przeprowadzanych symulacji w MES oraz wyników przedstawionych na rys. 5.2, oraz brak informacji nt. opracowanego modelu MES oraz podstawowych parametrów przyjętych w modelowaniu MES, np. przyjęte modele matematyczne, uproszczenia modelu, typy elementów skończonych, warunki brzegowe, jaki program i jakie moduły wykorzystano. Podobnie dla przedstawionej na rys 5.24 siatki MES wycinka zaworu sterującego.

1.5 Symulacje numeryczne MES napędu serwowaworu oraz CFD przepływu oleju przez serwowawór są opisane zbyt ogólnie. Podobnie jak w pkt 1.2 wskazane byłoby rozwinięcie zagadnień dotyczących sposobu przeprowadzenia symulacji numerycznych. Wskazany również byłby szerszy opis wyników przedstawionych na rys. 5.25 i 5.26. Generalna uwaga dotycząca symulacji numerycznych MES, CFD – proszę o doprecyzowanie jakiego specjalistycznego oprogramowania użyto, jakich modeli matematycznych, oraz kluczowych parametrów podczas symulacji.

- 1.6 (&5.2. , str.101), W równaniach (5.36) i (5.37) - nie zdefiniowana funkcja $sg(x_s)$.
- 1.7 (Str. 88), Równanie (5.25) oraz rys. 5.5 - niezgodność oznaczeń r_{rs} oraz r_{so} .
Na rysunku 5.5 mimośród powinien mieć oznaczenie r_{so}
- 1.8 (Str. 115), Odwołanie do rys 5.38 powinno dotyczyć rys. 5.35
- 1.9 (Str.117), Błędne odwołanie do równań (5.86) i (5.87) - powinno dotyczyć odwołań do równań (5.73) i (5.74)
- 1.10 (Str 122), W rozdziale 5, w badaniach-numerycznych, nie podano zakresu parametrów wymuszeń sinusoidalnych o różnych amplitudach i częstotliwościach - proszę o doprecyzowanie.
- 1.11 (str 123, rys 5.41), Fragment zdania: „.. spadek amplitudy o 3 dB (29.7%) dla wymuszenia 25% wynosi około 90 Hz, natomiast dla wymuszenia 100%, spadek amplitudy 3 dB zarejestrowano już przy częstotliwości około 22 Hz” .
Odnosnie przedstawionych charakterystyki amplitudowo-fazowej na rys. 5.41 proszę o komentarz dotyczący wartości odczytanych wyników przy spadku amplitudy o 3dB.

4) Rozdział 6)

- 1.12 W opisie stanowiska badawczego brak specyfikacji oprzyrządowania i sprzętu pomiarowego, rejestrującego oraz sterującego wykorzystanego podczas badań eksperymentalnych (np. jakie zastosowano modele czujników, sensorów, modele kart pomiarowych, itp. , systemy rejestrująco-sterujące)
- 1.13 Badania eksperymentalne i nastawy układu regulacji - proszę wyjaśnić jak dobrano parametry regulatora
- 1.14 (Str. 130) „System akwizycji danych pomiarowych został zbudowany z wykorzystaniem karty LabView” - czy nie powinno być: karty National Instrument
- 1.15 (Str 132) „...dokonano elektronicznej kalibracji w oprogramowaniu sprzętowym serwozaworu (sterowniku) w celu optymalizacji liniowości serwozaworu w całym zakresie przepływu... ”, Proszę o doprecyzowanie w jaki sposób przeprowadzono kalibrację
- 1.16 (Str. 135), „P-A(1), P-B(2), T-A(1), T-B(1)” czy nie powinno być P-A(1), P-B(2), T-A(1), T-B(2)” ?

- 1.17 (Str. 135, rys 6.9), Wartości i nazwy zmiennych na osiach są mało czytelne
- 1.18 (Rys 6.11), Proszę o objaśnienie co jest przyczyną przesunięcia względem wartości zerowej na charakterystyce wzmocnienia ciśnienia w serwozaworze. Na Rys 6.11 brak wyjaśnienia oznaczeń : $dp1$, $dp2$,
- 1.19 (&6.4) Otrzymane różnice w wartościach dla uzyskanych logarytmicznych charakterystyk amplitudowej i fazowej serwozaworu sterującego dla przypadku symulacji komputerowej oraz badań na obiekcie rzeczywistym zostały przez Autora wyjaśnione (rys. 6.13 vs. rys. 5.41). Proszę o wyjaśnienie kształtu przebiegów krzywych (rys. 5.41) reprezentujących logarytmiczne charakterystyki amplitudowo-fazowej serwozaworu sterującego, dla przypadku symulacji komputerowej dla różnych poziomów amplitud sygnału wymuszającego. Jakie zmiany należałoby wprowadzić w modelu matematycznym aby uzyskać wygładzone przebiegi amplitudowo-częstotliwościowe, a dla wykresu fazowego jednoznacznie interpretowalne krzywe (np. w zakresie od 20-90 Hz, dla wymuszenia 50%,75% i 100%) ?
- 1.20 (str 138, fragment opisu do rys 6.13) „Dla wymuszeń o amplitudzie 25% przesunięcie fazowe 90 deg zarejestrowano dla częstotliwości w granicach 190 Hz, natomiast dla wymuszenia 25% podobne przesunięcie wystąpiło przy częstotliwości 210 Hz” - proszę o doprecyzowanie prawidłowego odczytu z rys 6.13
- 1.21 Niewielkie różnice w uzyskanych wynikach dla siłownika podczas badań numerycznych i doświadczalnych na obiekcie rzeczywistym również zostały wyjaśnione. Natomiast prosiłbym o wyjaśnienie rozbieżności w uzyskanym kształcie przebiegu charakterystyk amplitudowo-fazowych, oraz o wyjaśnienie przedstawionej w tabeli 6.3 rozbieżności wartości przesunięcia fazowego dla symulacji i badań eksperymentalnych.
- 1.22 (Str 140-142), Wymuszenia sygnałami harmonicznymi o różnych amplitudach i częstotliwościach - proszę o wyjaśnienie dlaczego podczas badań eksperymentalnych przyjęto tylko 5% amplitudy nominalnej skoro dla wymuszeń skokowych przyjęto wartości 100% sygnału, a badania odbywały się w tym samych warunkach.

4. Podsumowanie

Podjęty i rozwiązany przez Autora problem badawczy ma istotne znaczenie dla rozwoju technologii przyrostowych do budowy układów napędowych powierzchni sterowych w przemyśle lotniczym. Doktorant wykazał się nie tylko wiedzą teoretyczną dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna, ale i umiejętnościami praktycznymi wymaganymi do zaplanowania i samodzielnego przeprowadzenia badań naukowych.

Mgr inż. Krzysztof Warzocha udowodnił w swojej pracy doktorskiej, że potrafi sformułować cel badawczy, postawić tezę pracy, zaplanować i przeprowadzić prace teoretyczne wykorzystując złożony aparat matematyczny oraz konieczne badania numeryczne, laboratoryjne, doświadczalne i przemysłowe, wyciągnąć na tej podstawie prawidłowe wnioski oraz użyteczne zalecenia projektowe i eksploatacyjne.

Stwierdzam, że tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Warzochy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna i spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” i może być przedmiotem publicznej obrony przed komisją Radą Dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna” Politechniki Rzeszowskiej. Jednocześnie biorąc pod uwagę wysoki poziom ocenianej pracy i jej użyteczny charakter, aktualność tematu oraz szeroki zakres będę rekomendował Radzie Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o jej wyróżnienie.

Piotr Kowal