

dr hab. inż. Norbert GRZESIK, prof. LAW  
Lotnicza Akademia Wojskowa  
08-521 Dęblin  
ul. Dywizjonu 303 nr 35.

Stężyca 06.02.2023r.

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Modelowanie i badania elektro-hydraulicznego siłownika do zastosowań lotniczych wykonanego w technologii przyrostowej DMLS**

Autor rozprawy: mgr inż. Krzysztof Warzocha

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

### 1. PODSTAWA WYKONANIA RECENZJI

Recenzję opracowano na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta, Prof. PRz nr RM-530-15-02/2022 z dnia 30.11.2022 r. oraz przedłożonej rozprawy doktorskiej. Rozprawa napisana jest na 175 stronach, zawiera streszczenie w języku angielskim i polskim, spis rysunków i tabel, wstęp, sześć rozdziałów merytorycznych, podsumowanie i wnioski końcowe, dwa załączniki A i B, 107 pozycji literatury krajowej i zagranicznej. Pracę wzbogacono o wykaz akronimów i ważniejszych oznaczeń.

### 2. GENEZA PRACY, TEZA NAUKOWA, CEL, ZAKRES MERYTORYCZNY

Główną przyczyną podjęcia działań związanych z opracowaniem zaproponowanych w rozprawie rozwiązań były prace prowadzone przez Centrum Badawczo-Rozwojowe firmy Yasa i Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej nad nowoczesnymi i ultralekkimi rozwiązaniami technicznymi w obszarze systemów sterowania lotem.

Doktorant sformułował następującą tezę naukową pracy: ***Zastosowanie odpowiednich metod modelowania matematycznego i narzędzi informatycznych umożliwia predykcję i kształtowanie właściwości dynamicznych odpornego na uszkodzenia i wykonanego w technologii DMLS siłownika elektrohydraulicznego, z dokładnością wystarczającą do wdrożenia go w systemach pośredniego sterowania współczesnych samolotów komunikacyjnych.***

Celem przedstawionej do recenzji dysertacji było wykonanie modeli serwośiownika lotniczego służących wsparciu procesów projektowania, prototypowania, jak również możliwego wdrożenia, a także weryfikacja uzyskanych wyników poprzez przeprowadzenie badań na obiekcie rzeczywistym.

Do osiągnięcia przedstawionego powyżej celu Autor przeprowadził symulacje oraz badania siłownika wraz z jego podsystemami w warunkach różnorodnych wymuszeń. Dodatkowo przeprowadził badania wytrzymałościowe i oszacował możliwości stosowania metalowych części w krytycznych pod względem bezpieczeństwa lotniczych konstrukcjach hydraulicznych. Na wykonanym prototypie wyznaczył rzeczywistą charakterystykę statyczną i dynamiczną serwośiownika oraz zmierzył liniowość przepływu, histerezę oraz przecieki wewnętrzne w serwozaworze dzięki wyodrębnieniu sekcji serwozaworowej siłownika i wykorzystaniu specjalnej platformy testowej.

W moim przekonaniu, tytuł rozprawy, teza i cel zostały sformułowane w sposób przejrzysty i jasny w oparciu o szeroki zakres zgromadzonej i przeanalizowanej literatury (107 pozycji), której zakres tematyczny należy uznać za właściwy do realizacji niniejszej rozprawy.

### **3. MERYTORYCZNA CZĘŚĆ ROZPRAWY I UZYSKANE WYNIKI**

We wstępie Autor dokonał wprowadzenia w tematykę pracy oraz zawarł analizę aktualnego stanu wiedzy w zakresie kierunków badań przemysłu lotniczego nad budową lżejszych, bezpieczniejszych i bardziej przyjaznych środowisku statków powietrznych. Możliwe jest to do osiągnięcia m. in. poprzez ograniczanie masy układów napędowych powierzchni sterowych wraz z wykorzystywaną do ich zasilania hydrauliką siłową stosując do budowy lotniczych części hydraulicznych metaliczne technologie przyrostowe.



Umożliwia to niemal nieograniczone kształtowanie części przy zapewnieniu odpowiedniej wytrzymałości i sztywności przy relatywnie niskiej masie.

Przedstawione w pracy wyniki badań odniesiono do aktualnie wykorzystywanych napędów powierzchni sterowych (siłowników produkowanych z wykorzystaniem konwencjonalnych technik kształtowania części) w pośrednim systemie sterowania lotem.

**W rozdziale pierwszym** niniejszej pracy doktorskiej przedstawiono opis matematyczny ruchu statku powietrznego, na podstawie którego można określić zachowanie się samolotu w typowych stanach lotu. Opisano ideę pośredniego systemu sterowania lotem na przykładzie samolotu Airbus A330. W rozdziale tym, przedstawiono również aktualny stan wiedzy na temat siłowników elektro-hydraulicznych, elektro-hydrostatycznych i elektromechanicznych i ich praktyczne wykorzystanie w pośrednim systemie sterowania.

**Drugi rozdział** to opis metod redundancji stosowanych w krytycznych pod względem bezpieczeństwa systemach i urządzeniach lotniczych. Opisano typowe rozwiązania techniczne redundancji układów elektrycznego, hydraulicznego i mechanicznego stosowane w projektowaniu siłowników układu FBW (z ang. Fly By Wire).

**Trzeci rozdział** to opis problemu naukowego, cel i teza pracy doktorskiej.

**Czwarty rozdział** przedstawia wyniki badań dotyczące zastosowania technologii przyrostowych SLM/DMLS (z niem. Direkt Metall Laser Schmelzen) do wytwarzania lekkich i wytrzymałych elementów lotniczej hydrauliki siłowej wykorzystywanej w pośrednim systemie sterowania.

**W rozdziale piątym** przedstawiono modelowanie matematyczne zintegrowanych układów elektro-hydraulicznych. Na podstawie analizy projektowej serwozaworu i siłownika zaproponowano i przedstawiono modele matematyczne napędu zaworu sterującego, przepływu przez zawór sterujący, przecieków wewnętrznych występujących w serwozaworze, sił tarcia wewnętrznego występujących w siłowniku hydraulicznym, kompletnego serwośiłownika w konfiguracji tandemowej z uwzględnieniem redundancji systemowej. Dzięki tym modelom przeprowadzono:

- symulację zmiany prądów i napięć w uzwojeniach napędu serwozaworu przy wymuszeniu skokowym,
- analizę przepływu przez port sterujący serwozaworu i występujący spadek ciśnienia,
- analizę przecieku wewnętrznego występującego w serwozaworze sterującym,
- analizę sił działających na suwak w serwozaworze podczas przepływu.

Umożliwiło to również wyznaczenie charakterystyk dynamicznych tj. skokowej i amplitudowo-fazowej dla serwozaworu i serwośiłownika w szerokim paśmie sygnałów wymuszających.

Doświadczalna część rozprawy jest treścią **rozdziału szóstego**. Zmierzono w nim:

- wartość przepływu oleju hydraulicznego przez port sterujący przy stałym ciśnieniu zasilania,
- siły działające na suwak serwozaworu dla różnych wartości przepływu,
- przykrycie (dopasowanie) krawędzi sterujących swaka do otworów portów w tulei serwozaworowej;
- przeciek wewnętrzny serwozaworu sterującego.

Dodatkowo wyznaczono rzeczywiste charakterystyki wzmocnienia ciśnienia występującego na portach sterujących serwozaworu, a także rzeczywiste charakterystyki skokowe i amplitudowo-fazowe dla serwozaworu i kompletnego siłownika.

Rozprawę kończy podsumowanie zawierające wnioski i spostrzeżenia dotyczące modelowania elementów systemu sterowania lotem oraz możliwości jakie niesie ze sobą upowszechnienie tzw. druku 3D na redukcję masy układu i poprawę parametrów dynamicznych.

Dodatkowo zamieszczono **dwa załączniki**, w których zawarto:

- dane liczbowe, które po załadowaniu do pamięci podręcznej oprogramowania Matlab/Simulink są wykorzystywane przez opracowane modele symulacyjne;
- wybrane modele symulacyjne zrealizowane w oprogramowaniu Matlab/Simulink.

Załączniki stanowią dopełnienie i uszczegółowienie przeprowadzonych badań.

Zatem stwierdzam, że rozwiązanie postawionego zadania zostało przeprowadzone prawidłowo, a przyjęte założenia i metody nie budzą zastrzeżeń.



#### 4. UWAGI KRYTYCZNE

Sposób realizacji pracy nie budzi większych zastrzeżeń, jednak nie sposób nie wspomnieć tu o kilku uwagach krytycznych, szczególnie edytorskich, do których możemy zaliczyć:

- umiejscowienie spisu tabel i rysunków, który w mojej ocenie powinien znajdować się na końcu rozprawy;
- rozdzielanie zdań rysunkami lub tabelami – str. 29, 30, 54, 57, 71, 114;
- niewłaściwe style zdań – str. 44, 52;
- brak ujednoczenia cudzysłowów – str. 17, 32, 42, 49, 58, 60, 62;
- brak ujednoczenia justowania- str. 122;
- brak ujednoczenia opisów w języku angielskim – italik, str. 38;
- brak przecinków, kropek – str. 23, 24, 41, 53, 111, 114; lub liter – str. 58;
- literówki – str. 40, 45, 59, 104.

Stwierdzone błędy nie mają jednak wpływu na jakość pracy oraz jej stronę merytoryczną i nie umniejszają pozytywnego odbioru pracy.

Dodatkowo proszę podczas obrony o odpowiedź na poniższe pytania:

1. Co zdecydowało o wykorzystaniu stali maraging 1.2709, czy były jakieś badania w tym zakresie poza porównawczymi badaniami wytrzymałościowymi innych stali maraging (np. 18Ni1400)?
2. Czy podczas realizacji badań brano pod uwagę wykorzystanie innych materiałów niż stal 1.2709 i jeśli tak to jakie i jakie były wyniki tych badań;
3. Czy podczas realizacji badań brano pod uwagę wykorzystanie zaproponowanych rozwiązań w innych urządzeniach i konstrukcjach lotniczych – jeśli tak to w jakich?
4. Czy rozpatrywano wykorzystanie wyników badań na innych typach statków powietrznych, np. w lotnictwie turystycznym, niekomercyjnym?

## 5. OCENA ROZPRAWY I WNIOSEK KOŃCOWY

W pracy w sposób wyczerpujący opisano szereg zagadnień, które przyczyniają się do pogłębienia wiedzy z zakresu modelowania matematycznego i symulacji zaawansowanych systemów lotniczych. Doktorant opracował nieliniowy model dynamiczny serwozaworu sterującego serwośiłownikiem FBW oraz kompletny siłownik na poziome funkcjonalnym, przedstawiając dynamiczną odpowiedź układu w szerokim paśmie sygnałów wymuszających. Wyniki pracy wykorzystane zostały do zadań projektowych systemu sterowania elektronicznego w firmie Yasa. Prezentowana tematyka wpisuje się również w zagadnienia pełnej symulacji lotu, gdzie modele poszczególnych podsystemów są sprzężone z różnymi modelami głównych systemów (np. elektrohydrauliczne siłowniki jako elementy wykonawcze systemu pośredniego sterowania). Autor w pełni osiągnął zamierzony cel naukowy.

Za główne osiągnięcia w pracy uważam:

- zbadanie możliwości zastosowania technologii przyrostowej SLM/DMLS do produkcji lotniczych części hydraulicznych, co zaowocowało zaprojektowaniem przez Centrum Badawczo-Rozwojowe firmy YASA prototypu siłownika FBW w tej technologii;
- potwierdzenie możliwości zastosowania druku 3D do wykonania wybranych elementów konstrukcji lotniczych (kanałów wewnętrznych o zmiennych polach przekrojów i umieszczenie dwóch hydraulicznych serwozaworów wraz z tulejami rozdzielaczy sterujących w centralnej obudowie pomiędzy tłoczyskami o niespotykanym dotąd poziomie integracji systemów);
- przeprowadzenie szeregu badań na obiektach rzeczywistych (serwozawór i serwośiłownik) i ich krytyczna ocena po porównaniu z badaniami symulacyjnymi opracowanych modeli matematycznych.

Należy również zauważyć i docenić aktywność naukową Doktoranta podczas realizacji badań, która zaowocowała:

- opracowaniem i opatentowaniem metody wytwarzania ultralekkich korpusów zaworów do zastosowań lotniczych;



- opatentowaniem wielokanałowego, bez-szczotkowego silnika osiowo-strumieniowego do zastosowań lotniczych w systemach sterowania elektronicznego;
- opracowaniem i zaprezentowaniem wybranych problemów recenzowanej rozprawy na międzynarodowej konferencji naukowej oraz publikację dwóch artykułów w uznanych, międzynarodowych czasopiśmie naukowych.

Podsumowując stwierdzam, że:

- rozprawa stanowi samodzielne opracowanie problemu naukowego dotyczącego modelowania matematycznego i zaawansowanych symulacji systemów lotniczych;
- Doktorant przedstawił tezę i cel rozprawy; zgodnie z zasadami naukowymi przeprowadził badania problemu, udowodnił tezę i sformułował wnioski;
- układ, zakres i treść merytoryczna rozprawy świadczą o tym, że Doktorant opanował metodologię badań oraz umiejętność interpretowania wyników i formułowania wniosków;
- Doktorant jest przygotowany do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych.

Uzyskane w pracy wyniki stanowią ważny krok w badaniach nad możliwością zastosowania technologii SLM/DMLS do produkcji lotniczych części hydraulicznych.

Autor wykazał się znajomością i opanowaniem wiedzy w dyscyplinie objętej pracą doktorską, wniósł samodzielny wkład w jej rozwój.

Opiniowaną rozprawę doktorską mgr. inż. mgr inż. Krzysztofa Warzochoy pt.: „Modelowanie i badania elektro-hydraulicznego siłownika do zastosowań lotniczych wykonanego w technologii przyrostowej DMLS” oceniam pozytywnie tak pod względem metodologicznym, jak i merytorycznym. Uważam, że spełnia ona w pełni wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o tytule naukowym i stopniach naukowych (Dz.U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) i mieści się w dziedzinie inżynieria mechaniczna.

W związku z tym wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Norbat Szwed