

Dr hab. inż. Damian Gąsiorek, prof. PŚ.
Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej
Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Ul. Konarskiego 18A
44-100 Gliwice
e-mail: Damian.Gasiorek@polsl.pl

Gliwice 07.04.2023 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej *mgr inż. Krzysztofa Warzochy*
zatytułowanej

*„Modelowanie i badania elektro-hydraulicznego siłownika do zastosowań lotniczych
wykonanego w technologii przyrostowej DMLS”.*

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia RM-530-15-01/2022 Przewodniczącego Rady
Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna dr hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz z dnia
30.11.2022 r.

1. Zakres rozprawy

Pojawienie się w latach 80-tych ubiegłego wieku technologii przyrostowych zapoczątkowało pojawienie się pojęcia szybkiego prototypowania, czyli wykorzystania druku 3D do wykonywania prototypów. W kolejnych latach rozwijały się różne techniki druku 3D, co zaowocowało komercjalizacją wydruku 3D do produkcji małoseryjnych. Jedną z kluczowych branż poszukującą nowych materiałów i technologii wytwarzania komponentów jest szeroko rozumiane lotnictwo. Obniżenie wagi samolotu o jeden kilogram wystarczy do tego, aby maszyna w ciągu całego życia wyemitowała o 25 ton dwutlenku węgla mniej. Szacuje się, że elementy wydrukowane w 3D mogą być o około 55 proc. lżejsze od tych wytworzonych tradycyjnymi technikami. Dodatkowo pozwalają zmniejszyć zużycie materiału nawet o 90 procent dzięki brakom odpadów i optymalizacji postaci konstrukcyjnej elementów. Na dzień dzisiejszy najwięksi producenci samolotów, czyli Airbus i Boeing w pełni korzystają z dobrodziejstw technologii przyrostowych. Airbus już w 2014 roku rozpoczął testy elementów tytanowych wyprodukowanych w taki sposób, od 2017 r. są one na wyposażeniu samolotów seryjnych. W kabinach Airbusów A320 latających w barwach Finnair znajdują się widoczne dla pasażerów części wykonane na drukarkach 3D, czyli panele wypełniające luki w rzędzie schowków ponad siedzeniami. Rekordzistą w ilości

elementów wydrukowanych w 3D wśród samolotów jest Airbus. W samolocie A350 XWB ponad 1000 elementów zostało wytworzone addytywnie z termoplastycznego polieteroimidu, który charakteryzuje się wysoką wytrzymałością mechaniczną, uzyskaną przez wysoki stosunek siły do masy, dzięki czemu właściwościami przypomina stal. Zastosowanie technologii addytywnej pozwoliło usprawnić produkcję oraz skrócić czas wykonywania elementów. Boeing od 1997 r. prowadzi prace badawczo-rozwojowe w dziedzinie zastosowania technologii przyrostowych w produkcji samolotów. Obecnie Boeing produkuje ponad 60 tys. różnych elementów wydrukowanych w 3D, które stosuje zarówno w maszynach komercyjnych i wojskowych. Przemysł lotniczy to olbrzymia gałąź gospodarki, obejmująca zastosowania komercyjne, przemysłowe i wojskowe. Szeroko rozumiany przemysł lotniczy składająca się z wielu działów, np. zajmujących się projektowaniem, produkcją, obsługą i konserwacją samolotów czy statków kosmicznych. Lotnictwo jest motorem rozwoju druku 3D, gdyż wiele elementów maszyn powietrznych jest wytwarzane za pomocą technologii addytywnej. Dotyczy to zarówno prototypów, jak i elementów użytku końcowego. Szczególnie przydatne okazuje się zastosowania technologii przyrostowych do konstruowania silników i turbin, co oznacza opanowywanie wyzwań, takich jak optymalizacja objętości, wydajności i ekologiczności. Zastosowanie druku 3D do produkcji elementów silników i turbin pozwala na produkcję silników ze skomplikowaną geometrią, określonymi właściwościami aerodynamicznymi oraz właściwościami dynamiki płynów, jak również lekkich struktur.

W pracy przedstawiono badania modelowe i doświadczalne oraz analizę uzyskanych wyników. W efekcie pracy powstał rzeczywisty element sterujący układu hydraulicznego wykonany w technologii przyrostowej. Jest to przykład pozytywnego wykorzystania wiedzy inżynierskiej, szczególnie w obszarze nowych technologii wytwarzania elementów konstrukcyjnych.

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie autorskich modeli serwośilownika lotniczego służącego do wsparcia procesów projektowania, prototypowania i wytwarzania komercyjnych elementów dla przemysłu lotniczego.

Rozprawa doktorska obejmuje 149 stron tekstu bez bibliografii, którą stanowi 107 pozycji literaturowych. Dodatkowo w pracy zamieszczono 2 załączniki obejmujące 9 stron, na których znajdują się dane liczbowe użyte przez Autora w pracy do obliczeń numerycznych w środowisku Matlab/ Simulink oraz wybrane modele zrealizowane w programie Matlab/Simulink. Praca podzielona została na 6 rozdziałów wraz z podrozdziałami. Na początku pracy Autor zestawiał wykaz akronimów, ważniejszych oznaczeń i spis rysunków, co stanowi 11 stron pracy. Zakończenie pracy stanowi streszczenie pracy w języku polskim i angielskim.

W wyniku prowadzonych prac naukowo-badawczych przez Autora pracy powstały dwa patenty:

- PL227484: Method for Manufacturing the Aircraft Valve Block,

- PL234702: Wielokanałowy bezszczotkowy silnik osiowo-strumieniowy, zwłaszcza do zastosowań lotniczych w systemach sterowania elektronicznego, oraz jego zastosowanie do napędu suwaka obrotowego w serwośiłownikach lub serwozaworach stosowanych w systemach sterowania elektronicznego.

Recenzowana rozprawa mieści się w szeroko pojętej dyscyplinie naukowej – inżynieria mechaniczna.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

We wstępie pracy Doktorant opisuje bezpośrednią przyczynę podjęcia tematu modelowania i badań napędów powierzchni sterowych oraz ocenę możliwości zastosowania technologii przyrostowych do ich produkcji. W tej części pracy Autor przedstawia również opis poszczególnych rozdziałów w pracy. Wydaje się, że zbyt mało skupił się na przedstawieniu problemu w ujęciu krajowym i światowym, co mogłoby wskazać na potrzebę takiej pracy. Brakuje przeglądu dostępnej literatury dotyczącej tematu pracy. Zamieszczone we wstępie streszczenia rozdziałów pasują bardziej do streszczenia pracy, która znajduje się na końcu pracy.

Rozdział pierwszy stanowi opis serwośiłowników w układach sterowania współczesnych samolotów komunikacyjnych. W poszczególnych podrozdziałach opisał siłowniki:

- elektrohydrauliczne,
- elektrohydrostatyczne,
- elektromechaniczne.

W rozdziale tym przedstawił opis matematyczny ruchu statku powietrznego, oraz opisał ideę pośredniego systemu sterowania lotem. W tym rozdziale Autor przedstawił również aktualny stan wiedzy na temat siłowników stosowanych w pośrednich systemach sterowania.

W rozdziale drugim Autor przedstawił metody redundancji stosowane w krytycznych pod względem bezpieczeństwa systemach i urządzeniach lotniczych, oraz opisał typowe rozwiązania techniczne redundancji stosowane przy projektowaniu siłowników FBW.

Wstęp i pierwsze dwa rozdziały to 47 stron, co stanowi podstawę dla **rozdziału trzeciego**, którym jest „Problem naukowy, cel i teza pracy”.

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie autorskich modeli serwośiłownika lotniczego służącego wsparciu procesów projektowania, prototypowania, jak również możliwego wdrożenia, a także weryfikacji uzyskanych wyników poprzez przeprowadzenie badań na obiekcie rzeczywistym. Autor dodatkowo stawia tezę pracy: Zastosowania 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. W tej części pracy Doktorant bardzo skrótowo opisuje zakres badań, który mógł być bardziej rozwinięty i opisany bardziej szczegółowo.

W **rozdziale czwartym** Doktorant opisał technologie budowy i rozwiązania techniczne siłownika FBW firmy Yasa. W rozdziale tym przedstawił:

- zastosowanie techniki druku 3D DLMS i badania wytrzymałościowe materiału, a w szczególności statyczną próbę rozciągania, badania zmęczeniowe podczas jednostronnego rozciągania i badania zmęczeniowe ciśnieniowe.

- budowę siłownika z uwzględnieniem redundancji.

Wydaje się, że badania mechaniczne materiału są zbyt szczątkowe, brakuje typowych badań materiałowych takich jak np. badanie struktury materiału, składu chemicznego. Autor proponuje nowoczesną technologię wytwarzania, która wykazuje anizotropowość materiału.

W kolejnym, **piątym rozdziale** Autor rozprawy przedstawił opracowane modele matematyczne zintegrowanych układów elektro-hydraulicznych. W ramach rozdziału opisał opracowane:

- modele matematyczne bezpośredniego napędu rozdzielacza,
- modelowanie przepływu w serwozaworze o bezpośrednim napędzie suwaka,
- modelowanie przecieku wewnętrznego serwozaworu sterującego,
- analizę i modelowanie sił działających na suwak rozdzielacza,
- model matematyczny serwośiownika,
- model matematyczny serwośiownika w konfiguracji tandemowej

Rozdział szósty dotyczy badań laboratoryjnych, dzięki którym możliwa była walidacja opracowanych w środowisku Matlab/ Simulink modeli matematycznych. W pierwszej części rozdziału Doktorant opisał stanowisko badawcze, które mieści się w firmie Yasa Motors Poland, a następnie opisał zrealizowane na tym stanowisku badawczym badania serwozaworu sterującego oraz serwośiownika. Rozdział ten zakończony jest analizą uzyskanych wyników i porównaniem ich z wynikami z symulacji komputerowych. Na zakończenie na wykresie 6.20 porównał charakterystyki amplitudowo-fazowe siłownika Yasa wykonanymi techniką druku 3D DMLS z klasycznymi siłownikami EHA, EMA i EHSA. Autor stwierdza, że na podstawie wyznaczonych charakterystyk dynamicznych badanego siłownika i porównaniu ich z dostępnymi charakterystykami siłowników na rynku można stwierdzić, że zastosowanie odpowiednich metod modelowania umożliwia predykcję i kształtowanie właściwości dynamicznych siłownika wystarczającą do wdrożenia go w systemach pośredniego sterowania współczesnych samolotów komunikacyjnych.

Kolejnym elementem pracy jest podsumowanie i wnioski do pracy doktorskiej. Składa się na nie 10 wniosków, w których Doktorant odniósł się do wyników analiz numerycznych i badań eksperymentalnych. Wnioski zakończone są stwierdzeniem, że osiągnięto w pracy cel pracy i potwierdzono tezę pracy. Na koniec Autor wspomniał o potrzebie dalszych badań i wskazał ich dalsze kierunki.

Doktorant załączył do pracy dwa dodatki. W załączniku pierwszym przedstawił dane liczbowe wykorzystywane do obliczeń w środowisku Matlab/Simulink. W załączniku drugim przedstawił wybrane modele zrealizowane w środowisku Matlab/ Simulink

3. Najważniejsze osiągnięcia pracy

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie autorskich modeli serwośiłownika lotniczego służącego wsparciu procesów projektowania, prototypowania, jak również możliwego wdrożenia, a także weryfikacji uzyskanych wyników poprzez przeprowadzenie badań na obiekcie rzeczywistym.

Do najważniejszych osiągnięć badawczych przedstawionej pracy doktorskiej należy zaliczyć:

- Opracowano model matematyczny serwo-siłownika elektrohydraulicznego uwzględniający pełną redundancję obwodów elektronicznych, duplaksową konfigurację układów hydraulicznego i mechanicznego..
- Określono modele matematyczne elektronicznego napędu rozdzielacza serwowaworu w konfiguracji quadrupleksowej z pełną separacją ścieżek zasilających, model serwowaworu i model matematyczny kompletnego serwo-siłownika.
- Wykonano analizy przepływu oleju przez serwowawór metodą elementów skończonych w środowisku CFD.
- Opracowano model rzeczywisty serwo-siłownika YASA technologią przyrostową w technice DLMS.
- Przeprowadzono analizy własności mechanicznych materiałów do druku 3D w technice DMLS.
- Otrzymano zbliżone charakterystyki statyczne serwowaworu sterującego z opracowanych modeli matematycznych i z modeli rzeczywistych.
- Otrzymano zbliżone charakterystyki skokowe i częstotliwościowe serwo-siłownika z opracowanych modeli matematycznych i z modeli rzeczywistych.
- Możliwe było opracowanie i wykonanie serwośiłownika, który dla żądanych sygnałów wymuszających odznaczał się najmniejszym spadkiem amplitudy sygnału wyjściowego względem sygnału wejściowego, a także najmniejszym przesunięciem fazowym w odniesieniu do podobnych modeli stosowanych komercyjnie w pośrednich systemach sterowania współczesnych samolotów komunikacyjnych.
- Zaproponowano nowatorskie podejście do projektowania i produkcji części hydraulicznych stosowanych w lotnictwie.

- Zaprezentowane w pracy badania łączą ze sobą wiedzę z różnych dyscyplin naukowych zarówno z inżynierii mechanicznej jak i np. materiałowej, czy mechaniki płynów.
- Rozprawa ma charakter teoretyczno-empiryczny, a zaprezentowane badania wskazują na dojrzałość naukową Doktoranta.
- Opracowana i przedstawiona w pracy metoda badawcza pozwala na dalsze badania występowania ewentualnych błędów lub uszkodzeń w systemach wewnętrznych siłownika FBW i ich wpływowi na zmiany parametrów dynamicznych siłownika.
- Autor udowodnił, że istnieje możliwość wykonania modeli serwośiownika lotniczego do celów komercyjnych z użyciem technologii przyrostowych.
- W wyniku prowadzonych prac naukowo-badawczych przez Autora pracy powstały dwa patenty:
 1. PL227484: Method for Manufacturing the Aircraft Valve Block,
 2. PL234702: Wielokanałowy bezszczotkowy silnik osiowo-strumieniowy, zwłaszcza do zastosowań lotniczych w systemach sterowania elektronicznego, oraz jego zastosowanie do napędu suwaka obrotowego w serwośiownikach lub serwozaworach stosowanych w systemach sterowania elektronicznego.

4. Uwagi do pracy

Praca dotyczy złożonych i trudnych zagadnień, co zrodziło kilka pytań i wątpliwości:

Uwaga ogólna:

W tytule pracy Autor używa określenia „...wykonanego w technologii przyrostowej DMLS“, a we wstępie pisze o użyciu technik przyrostowych. Zasadniczo pojecie technologiczne dotyczy szeroko rozumianych technologii jakimi są technologie przyrostowe, natomiast konkretna używana przez Autora technika DMLS mieści się w bardziej wąskiej grupie zwanej techniką. Technika to "w ściślejszym znaczeniu środki i procedura przy wytwarzaniu jakiegoś wyrobu przemysłu lub rzemiosła", a technologia to "Nauka o przeróbce surowców na przedmioty użyteczne. Reasumując przykładem technologii przyrostowych jest jedna z technik wytwarzania czyli technika DMLS.

- Autor wskazuje cel pracy, a na końcu rozdziału 3 dodatkowo stawia tezę pracy. Zazwyczaj w pracach naukowych wstawia się albo cel pracy albo tezę (str. 65-67).
- W pracy brakuje opisu szczegółowego zakresu pracy, który zazwyczaj towarzyszy celowi pracy.
- Przedstawiona w pracy technika DMLS mogła zostać porównana z tańszą i szybszą metodą wytwarzania z proszków metali, czyli techniką Binder Jetting. W metodzie Binder Jetting można wytwarzać elementy z prędkością osiągającą nawet 40 kg

metal na godzinę, to znacznie szybsza metoda druku 3D w porównaniu z techniką DMLS.

- Wydaje się, że Autor we wstępie zbyt mało skupił się na przedstawieniu problemu w ujęciu krajowym i światowym, co mogłoby wskazać na potrzebę takiej pracy. Brakuje przeglądu dostępnej literatury dotyczącej tematu pracy. Zamieszczone we wstępie streszczenia rozdziałów pasują bardziej do streszczenia pracy, która znajduje się na końcu pracy.
- Przedstawione w rozdziale czwartym badania mechaniczne materiału są zbyt szcążkowe, brakuje typowych badań materiałowych takich jak np. badanie struktury materiału, składu chemicznego. Autor proponuje nowoczesną technologię wytwarzania, która wykazuje anizotropowość materiału.
- W rozdziale czwartym Autor wspomina o konieczności zastosowania metody elementów skończonych do wyznaczenia stałych silnika elektrycznego. Brakuje informacji dotyczącej warunków początkowo brzegowych do takich obliczeń oraz informacji w jakim środowisku obliczeniowym zostały przeprowadzone obliczenia numeryczne.
- Autor w wyniku symulacji otrzymał sporo wykresów 5.7 – 5.22, dla których wykonał szcążkową analizę przez, co wykresy wydają się zbyteczne. Celem ich przedstawienia miała być analiza porównawcza, co wykonał bardzo zgrubnie.
- Przy zestawieniu i porównaniu wyników eksperymentalnych i symulacyjnych np. tabela 6.2 i 6.3 brakuje wyznaczenia błędów, które w pracy naukowo badawczej powinny być zestawione.
- Analiza wyników zawarta w pracy mogła być bardziej szczegółowa. Autor otrzymał szereg wyników analiz numerycznych i doświadczalnych. W podsumowaniu pracy brakuje zestawienia tabelarycznego otrzymanych wyników.
- Streszczenie pracy mogło być bardziej obszerne.
- Wstęp i podsumowanie pracy powinno być oznaczone kolejnymi rozdziałami.

Uwagi szczegółowe:

- Strona 18 – we wstępie Autor pracy rozwija skrót techniki druku DMLS podając jej pełną niemiecką nazwę, a pozostałe nazewnictwo z języka angielskiego. Ta technika druku w języku angielskim również odnosi się do skrótu DMLS, czyli Direct Metal Laser Sintering.
- Strona 74 – Rys.4.1 – Wykres Goodmana można było przedstawić nieco jaśniej z legendą pod wykresem wyjaśniającym poszczególne elementy wykresu.
- Strona 83 – W podpisie pod rysunkiem Autor jedynie wspomina, że prezentuje wyniki obliczeń MES, niestety nie ma informacji jakie wyniki prezentuje.
- Strona 102 – Rysunek 5.24 – brak informacji jakimi elementami skończonymi zdyskredytowano obiekt, czy zastosowano elementy dostosowane i w jakim

środowisku wykonano obliczenia, brakuje również jakiegokolwiek informacji o przyjętych warunkach brzegowo początkowych do obliczeń CFD.

- Strona 144 – 145: tabela 6.2 – 6.3 – przy porównaniu wyników brakuje metody wyznaczenia błędów modelu numerycznego i doświadczalnego. Wydaje się, że Autor w pracy nie stosuje nawet podstawowych metod statystycznych stosowanych do badań naukowych.

Uwagi krytyczne nie umniejszają osiągnięć Autora, często mają charakter dyskusji naukowej. Ponadto należy stwierdzić, że praca została zredagowana starannie i zgodnie z zasadami przygotowania rozpraw o charakterze naukowym.

5. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z treścią recenzowanej rozprawy stwierdzam, iż stanowi ona istotny przyczynek naukowy do badań dotyczących możliwości zastosowania technologii przyrostowych do wykonywania prototypów oraz elementów konstrukcyjnych maszyn szczególnie w przemyśle lotniczym. Poprawna realizacja celu i zakresu badań wymagała wiedzy z różnych obszarów nauki. W trakcie prac Doktorant zapoznał się z metodami modelowania matematycznego układów elektrycznych, mechanicznych w środowisku Matlab/ Simulink, techniką druku 3D DMLS i metodami doświadczalnymi wyznaczania stałych mechanicznych materiałów. Doktorant wykazał się umiejętnością właściwego przygotowania warsztatu naukowego, przeprowadził ciekawe i trudne do realizacji badania modelowe i doświadczalne. Uwagi krytyczne nie umniejszają osiągnięć Autora, często mają charakter dyskusji naukowej.

*Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że w ocenie całościowej praca ta spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z zm.). Zrealizowana przez **mgr inż. Krzysztofa Warzochę** praca pt. „**Modelowanie i badania elektro-hydraulicznego siłownika do zastosowań lotniczych wykonanego w technologii przyrostowej DMLS**”. stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego i wnosi istotny wkład w dyscyplinę inżynieria mechaniczna. Ponadto wskazuje na zadowalający poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej jej Autora. Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.*

Recenzent

