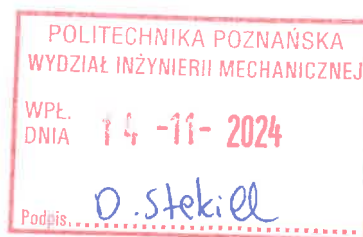


Dr hab. inż. Ryszard Jasiński, prof. PG  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Politechnika Gdańska  
ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk  
e-mail: ryszard.jasinski@pg.edu.pl  
tel. 603072499

Gdańsk, 08.11.2024



**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Jakubowskiego**  
**pt.: Analiza i badania liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu**  
**napędowego**

**1. Uwagi wstępne**

Recenzję rozprawy wykonano na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej, pismo nr DIM.075.242.2024 Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej dr. hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP z dnia 26.09.2024 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

Recenzowana praca, będąca przedmiotem rozprawy, obejmuje 100 stron i składa się ze streszczenia w języku polskim, wykazu ważniejszych oznaczeń, 6 rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 81 pozycji. Praca została napisana w języku polskim.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki.

**2. Ocena doboru tematu rozprawy**

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Jakubowskiego koncentruje się na wykonaniu i badaniach liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego, którego głównymi elementami są: siłownik i silnik hydrauliczny wraz ze sterującymi nimi zaworami elektrohydraulicznymi. Połączenie elementów wykonawczych: liniowego i obrotowego pozwala na wykorzystanie zalet siłownika i silnika hydraulicznego. Ograniczenia napędu tylko z siłownikiem eliminowane są przez hydrauliczny silnik obrotowy, a ograniczenia napędu z hydraulicznym silnikiem poprawia napęd z siłownikiem. Połączenie tych dwóch napędów w jeden zespół napędowy, pozwala na zastosowanie sterowania nadrzędnego tymi napędami, dzięki czemu możliwa jest poprawa parametrów zaproponowanego rozwiązania napędu liniowo-obrotowego.

Doktorant dokonał przeglądu literatury, w której przedstawił wyniki badań sterowania zarówno liniowymi jak i obrotowymi napędami elektrohydraulicznymi. Autor

stwierdził, że w żadnej publikacji z ponad 100 pozycji, nie napotkał prac, w których została podjęta problematyka równoczesnego sterowania napędem liniowym i obrotowym. Na podstawie tego stwierdził, że nie podejmowano dotychczas zaawansowanych badań dotyczących budowy zespołów napędowych, składających się z napędu liniowego i obrotowego oraz badań na temat równoczesnego sterowania napędem liniowym i obrotowym, które tworzą jeden elektrohydrauliczny zespół napędowy.

Prezentowana praca wychodzi na przeciw tym oczekiwaniom, a Doktorant zaprezentował właściwe podejście do rozwiązania problemu związanego z konstrukcją i badaniami liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego. Należy podkreślić, że Autor pracy zbudował i przebadał jako pierwszy liniowo-obrotowy elektrohydrauliczny zespół napędowy.

Uważam, że mgr inż. Arkadiusz Jakubowski, słusznie zajął się w swojej rozprawie budową i badaniami liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego, gdyż to rozwiązanie znakomicie wpisuje się w potrzeby rozwijającego się rynku nowych rozwiązań. Podjęty przez Doktoranta w rozprawie problem badawczy jest uzasadniony.

### **3. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Zasadnicza treść rozprawy zawarta jest w 6 rozdziałach. Treść rozdziałów jest powiązana z tytułem rozprawy i stanowi jego rozwinięcie oraz odpowiada sformułowanym celom rozprawy.

We wstępie Autor przedstawia bazowe informacje nt. podjętego w pracy problemu badawczego, odwołując się do prac naukowych z tego zakresu, jednocześnie przedstawia uzasadnienie dla podjęcia przedmiotowego tematu.

W rozdziale drugim Autor dokonał przeglądu aktualnego stanu wiedzy dotyczącego budowy i sposobów sterowania serwonapędów elektrohydraulicznych. Przedstawił badania, prezentowane w literaturze, dotyczące sterowania zarówno liniowymi jak i obrotowymi napędami elektrohydraulicznymi. Doktorant, na podstawie przeglądu literatury, nie napotkał prac, w których została podjęta problematyka równoczesnego sterowania napędem liniowym i obrotowym. Stwierdził, że nie podjęto jeszcze zaawansowanych badań zespołów napędowych, składających się z napędu liniowego i obrotowego oraz badań na temat równoczesnego sterowania napędem liniowym i obrotowym, które tworzą jeden elektrohydrauliczny zespół napędowy.

Rozdział trzeci zawiera między innymi cele oraz tezę pracy.

Zaproponowane przez Doktoranta cele pracy:

1. Zbudowanie elektrohydraulicznego liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego oraz stanowiska do jego badań,

2. Opracowanie metody sterowania zespołem napędowym,
3. Zbudowanie modelu teoretycznego i symulacyjnego serwonapędu,
4. Zaproponowanie metod równoczesnego sterowania dwoma napędami,
5. Przeprowadzenie badań symulacyjnych i doświadczalnych zespołu napędowego.

Teza pracy:

Zespół serwonapędowy, składający się z elektrohydraulicznego serwonapędu obrotowego i liniowego, może pozycjonować element zawieszony na linie, z taką samą dokładnością jak dokładność pozycjonowania napędu liniowego oraz uzyskiwać krótkodystansowo prędkości ruchu mniejsze i większe od prędkości uzyskiwanych przez napęd liniowy oraz obrotowy.

Rozdział czwarty zawiera zależności, które związane są z serwonapędem wyposażonym w siłownik, jak i w silnik hydrauliczny. Zależności te pozwoliły na opracowanie ich modeli symulacyjnych w środowisku Matlab-Simulink. Zbudowanie tych obu modeli symulacyjnych, pozwoliło na wykonanie badań symulacyjnych w celu doboru i określenia parametrów regulatorów typu PID oraz opracowania algorytmu sterowania liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego.

Wykonanie modelu symulacyjnego liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego pozwoliło na przeprowadzenie testów symulacyjnych tego zespołu z regulatorem nadrzędnym, którego rolę pełnił regulator PID. Przeprowadzono testy symulacyjne odpowiedzi skokowych liniowo – obrotowego serwonapędu dla różnych nastaw regulatora nadrzędnego. Badano odpowiedzi skokowe serwonapędu pracującego z regulatorem PID przy ciśnieniu zasilania  $p_0 = 8$  MPa. Sygnałem wymuszającym był sygnał typu skok jednostkowy odpowiadający przemieszczeniu o 50 mm.

Rozdział piąty zawiera opis stanowiska do badania zaprojektowanych i zbudowanych w ramach niniejszej pracy serwonapędów. Na stanowisku przeprowadzono badania doświadczalne sterowania jednoczesnego lub oddzielnego serwonapędem z siłownikiem i serwonapędem z silnikiem hydraulicznym. Układ sterowania był zbudowany na bazie sterownika PLC typu Power Panel 500. Był on wyposażony w panel dotykowy. Napisany program umożliwiał łatwą komunikację z użytkownikiem poprzez dedykowaną wizualizację. Na panelu, na bieżąco wyświetlano także wykresy (przebiegi w czasie), na których można było odczytać aktualne pozycje: siłownika, silnika i obciążnika.

Autor, po przeprowadzeniu wstępnych badań odpowiedzi skokowych elementów wykonawczych w otwartej pętli sterowania, rozpoczął badania wszystkich napędów w pętli zamkniętej. Zbadał pracę siłownika i silnika hydraulicznego dla różnych nastaw regulatora PID. Parametry wszystkich regulatorów PID dla serwonapędu z siłownikiem i silnikiem Autor dobrał doświadczalnie, przy założeniu, że odpowiedź

na skok jednostkowy powinna być jak najszybsza. Drugim czynnikiem, jaki Doktorant brał pod uwagę przy doborze parametrów regulatora PID, to brak oscylacji.

Przeprowadzone próby odpowiedzi na wymuszenie skokowe serwonapędu z siłownikiem potwierdziły poprawność początkowego doboru nastaw regulatora PID. Ostatecznie Autor dobrał nastawy, wykonując kilkadziesiąt prób dla różnych nastaw regulatora, zaczynając od zwiększania współczynnika  $K_p$ , po czym zwiększając wartości pozostałych współczynników tj.  $K_i$  i  $K_d$ .

Badanie odpowiedzi skokowych wykonano także dla serwonapędu z hydraulicznym silnikiem obrotowym. Przeprowadzono badania dla wartości wymuszenia skokowego na odległość 50 i 100 mm. Ruch obrotowy silnika był przeliczany w sterowniku na ruch liniowy.

Autor przeprowadził także badania liniowo-obrotowego zespołu napędowego, podczas którego następowało przemieszczanie obciążenia w wyniku pracy zarówno siłownika jak i silnika hydraulicznego. Oba napędy mogły wykonywać ruchy w różnych kierunkach i z różnymi prędkościami, tzn. pracować w różnej konfiguracji. W układzie sterowania występowały dwa wewnętrzne układy regulacji położenia: siłownika i silnika. W obu tych układach zastosowane były regulatory PID. Ich parametry dobrano w trakcie wcześniej wykonanych testów poszczególnych serwonapędów w taki sposób, żeby osiągnąć jak najszybszą odpowiedź układu i aby nie występowało przeregulowanie. Za pozycjonowanie obciążnika był odpowiedzialny regulator nadrzędny, którego zadaniem było wyznaczanie sygnałów zadanych do serwonapędów w celu pozycjonowania.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań.

W pracy występują błędy stylistyczne, literowe i redakcyjne. Błędy te jednak nie mają znaczenia w ogólnej ocenie pracy, zwłaszcza w ocenie merytorycznej. Zawarte w pracy rysunki i schematy w większości przypadków są dobrej jakości i posiadają wyczerpujący opis. Literatura jest aktualna i dobrana zgodnie z tematem pracy. Układ rozprawy i podział treści między poszczególnymi rozdziałami jest logiczny.

#### **4. Ocena rozprawy**

Dokonując oceny rozprawy należy podkreślić, że jej ogólna forma i zakres podyktowane zostały realizacją celów rozprawy.

Za główne osiągnięcia mgr. inż. Arkadiusza Jakubowskiego uważam:

1. Zaprojektowanie i zbudowanie liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego. Zespół napędowy składa się przede wszystkim z elementów: siłownika i silnika hydraulicznego wraz ze sterującymi ich pracą

zaworami elektrohydraulicznymi. Połączenie elementów wykonawczych: liniowego i obrotowego pozwala na wykorzystanie zalet siłownika i silnika hydraulicznego.

2. Opracowanie modeli symulacyjnych serwonapędu wyposażonego w siłownik, jak i w silnik hydrauliczny. Zbudowanie tych obu modeli symulacyjnych, pozwoliło na wykonanie badań symulacyjnych w celu doboru i określenia parametrów regulatorów typu PID oraz opracowania algorytmu sterowania liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego.
3. Wykonanie modelu symulacyjnego liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych tego zespołu z regulatorem nadrzędnym.
4. Wykonanie stanowiska do badania serwonapędów elektrohydraulicznych wyposażonego w system pomiarowy. Na stanowisku przeprowadzono badania sterowania jednoczesnego lub oddzielnego serwonapędem z siłownikiem i serwonapędem z silnikiem hydraulicznym. Autor po przeprowadzeniu wstępnych badań odpowiedzi skokowych elementów wykonawczych w otwartej pętli sterowania rozpoczął badania wszystkich napędów w pętli zamkniętej. Zbadał pracę siłownika i silnika hydraulicznego dla różnych nastaw regulatora PID. Parametry wszystkich regulatorów PID dla serwonapędu z siłownikiem i silnikiem Autor dobrał doświadczalnie, przy założeniu, że odpowiedź na skok jednostkowy powinna być jak najszybsza. Drugim czynnikiem, jaki Doktorant brał pod uwagę przy doborze parametrów regulatora PID, to brak oscylacji.

Zastosowanie liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego zamiast jednego napędu, czy to liniowego, czy obrotowego pozwala na poprawę dynamiki ruchu zawieszono obciążnika. Zwiększeniu ulega zakres możliwej prędkości ruchu obciążnika. Dokładność pozycjonowania zawieszono obciążnika jest taka sama jak dokładność pozycjonowania za pomocą jednego z serwonapędów. Otrzymane wyniki z badań eksperymentalnych liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego są zbieżne z wynikami z symulacji komputerowej.

Podsumowując, uważam że omówiona konstrukcja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Jakubowskiego oraz sposób opracowania materiału badawczego, a także forma przeprowadzonej analizy i przyjęta metodyka badań są właściwe dla tego rodzaju prac. Doktorant wykazał się wiedzą ogólną, dobrą znajomością przedmiotu badań oraz opanowaniem metod analitycznych i numerycznych stosowanych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.



## 5. Pytania szczegółowe

1. W rozdziale czwartym Autor podaje równania od (4.2) do (4.11) opisujące model układu wzmacniacz hydrauliczny – siłownik hydrauliczny z jednostronnym tłoczyskiem. Jakie równania opisują model układu wzmacniacz hydrauliczny - obrotowy silnik hydrauliczny?
2. Jakie wartości stałych i charakterystycznych współczynników zostały przyjęte do przeprowadzenia badań symulacyjnych serwonapędu z obrotowym silnikiem hydraulicznym?
3. Jakie wartości ciśnień (w komorach siłownika, na wejściu i wyjściu z silnika hydraulicznego) występowały podczas badań symulacyjnych serwonapędów?
4. Czy zostały wykonane badania symulacyjne serwonapędów podczas opuszczania i podnoszenia obiektów o różnych masach?
5. Czy można byłoby poprawić dokładność pozycjonowania obciążnika oraz skrócić czas ustalania sygnału odpowiedzi skokowej przez zastosowanie innych czujników do określenia położenia?
6. Autor założył, że głównym zastosowaniem badanego zestawu serwonapędowego będzie opuszczanie i podnoszenie obiektów zawieszonych na linie, przy czym napęd obrotowy będzie mógł wykonywać przemieszczenia obiektu nawet na kilkaset metrów.

Czy zostały wykonane badania symulacyjne liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego opuszczania i podnoszenia obiektu zawieszzonego na linie dla założonego zakresu pracy? Jaka może być dokładność pozycjonowania obiektu przemieszczanego przez serwonapęd na odległość kilkuset metrów?

Czy zostały wykonane badania doświadczalne liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego dla większych przemieszczeń obiektu, niż dla tych podanych w rozprawie doktorskiej?

7. Jakie założenia należy przyjąć oraz jak powinna wyglądać procedura doboru parametrów układu sterowania badanego liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego?

W jaki sposób powinno się dobrać parametry układu sterowania dla dowolnego liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego?

## 6. Wniosek końcowy oceny rozprawy

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- Doktorant dokonał trafnego wyboru tematyki swojej pracy oraz poprawnie określił jej zakres,

- cele pracy zostały osiągnięte w zakresie przyjętym przez Autora, prezentowane wyniki badań są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych symulacjach, eksperymentach i mogą służyć do dalszych prac badawczych,
- Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- rozprawa zredagowana jest poprawnie,
- praca dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy, a w wielu elementach wnosi do niej nowe treści.

Powyższe argumenty świadczą o umiejętnościach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

**Stwierdzam, że praca mgr. inż. Arkadiusza Jakubowskiego pt.: „Analiza i badania liniowo-obrotowego elektrohydraulicznego zespołu napędowego” (promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, w rozumieniu ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku, spełnia wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich zgodnie z obowiązującą Ustawą z dn. 20.07.2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2023 poz. 742, z późn. zm.).**

**W związku z tym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Arkadiusza Jakubowskiego i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

*Ryszard Janowski*

