

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, 15.01.2024



RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Białka

**pt.: Zastosowanie elastycznych poduszek z cieczą magnetoreologiczną
w konstrukcji chwytaka szczękowego robota**

1. Uwagi wstępne

Recenzję rozprawy wykonano na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej, pismo nr DIM.075.500.2023 Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej dr. hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP z dnia 20.11.2023 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

Recenzowana praca, będąca przedmiotem rozprawy, obejmuje 118 stron i składa się ze streszczenia w języku angielskim i polskim, wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, 8 rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 113 pozycje. Praca została napisana w języku polskim.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki, promotorem pomocniczym jest dr inż. Dominik Rybarczyk.

2. Ocena doboru tematu rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Białka koncentruje się na wykonaniu i badaniach innowacyjnego chwytaka szczękowego robota, w którym zastosowano ciecz magnetoreologiczną (ang. magnetorheological fluid – MRF lub MR fluid), umieszczoną w dwóch elastycznych poduszkach. Ciecz MR zmienia swoje właściwości pod wpływem pola magnetycznego, pozwalając tym samym na dostosowanie poduszek do kształtu chwytanego obiektu. Związane to jest z tym, że w niektórych procesach z wykorzystaniem manipulatorów występuje potrzeba chwytania elementów kruchych lub delikatnych, o nieregularnych tzw. swobodnych kształtach. W związku z powyższym Autor opracował innowacyjny chwytak, który umożliwi kontrolę procesu chwytania obiektów i ich wypuszczania.

Badania nad wykorzystaniem cieczy MR rozpoczęły się w latach 40-tych XX wieku, a różnego rodzaju urządzenia wykorzystujące ciecz MR są projektowane, badane i produkowane w różnych jednostkach naukowych i przemysłowych.

Doktorant dokonał przeglądu literatury, w której przedstawiono zaproponowane do tej pory różne konstrukcje chwytaków wykorzystujących ciecz MR. Autor stwierdził, że w żadnej publikacji nie przeprowadzono kompleksowej analizy obwodu magnetycznego chwytaka wykorzystującego ciecz MR, w szczególności badań MES różnych konfiguracji jego geometrii. Nie przedstawiono rozwiązań chwytaka hybrydowego o konstrukcji miętko-sztywnej, która byłaby przeznaczona dla robotów o bardzo małym udźwigu rzędu 3 kg. Doktorant zauważył, że nie przeprowadzono badań w celu określenia siły koniecznej do odkształcenia struktury miękkiej chwytaka, która ma kontakt z obiektem chwytanym. Jest to szczególnie istotne w przypadku chwytania elementów kruchych. Także stwierdził, że nie przeprowadzono badań porównawczych struktur hybrydowych o konstrukcji miętko-sztywnej, ze sztywnymi odpowiednikami tj. płaskimi szczękami konwencjonalnymi, wykorzystywanymi na przykład w fabrycznej konstrukcji chwytaków Robotiq z serii 2F. Zauważył także, że w produkowanych chwytakach nie wykorzystuje się technologii druku 3D do wykonania zbiorników cieczy MR. Autor ustalił, że nie zaproponowano mechanicznego rozwiązania konstrukcyjnego szczęki, które nie wymagałoby zewnętrznego sterowania i zasilania. Takie rozwiązanie pozwoliło na obniżenie masy chwytaka, co wpływa pozytywnie na jego udźwig. Zauważył również, że nie zaproponowano, jak wynika z przeglądu literatury, metody rejestrowania siły nacisku szczęk w trakcie transportowania obiektów przenoszonych przez chwytaki.

Prezentowana praca wychodzi na przeciw tym oczekiwaniom, a Doktorant zaprezentował komplementarne i systemowe podejście do rozwiązania problemu związanego z konstrukcją i badaniami chwytaka szczękowego robota, w którym zastosowano ciecz magnetoreologiczną. Należy podkreślić, że Autor pracy zbudował jako pierwszy prototypowe szczęki chwytaka o hybrydowej strukturze miętko-sztywnej, dzięki wyposażeniu ich w poduszki wypełnione cieczą MR, które umożliwiają chwytanie i przenoszenie delikatnych elementów. Wykonał badania wykorzystując sterowanie za pomocą pola magnetycznego właściwościami cieczy magnetoreologicznej znajdującej się w poduszkach wykonanych z termoplastycznego poliuretanu, umiejscowionych na szczękach chwytaka, za pomocą mechanizmu składającego się z magnesu trwałego oraz sprężyn.

Uważam, że mgr inż. Marcin Białek, słusznie zajął się w swojej rozprawie konstrukcją i badaniami innowacyjnego chwytaka szczękowego z dwiema elastycznymi poduszkami, w których zastosowano ciecz magnetoreologiczną, gdyż to rozwiązanie znakomicie wpisuje się w potrzeby rozwijającego się rynku nowych technologii. Podjęty przez Doktoranta w rozprawie problem badawczy jest uzasadniony.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Zasadnicza treść rozprawy zawarta jest w 8 rozdziałach. Treść rozdziałów jest powiązana z tytułem rozprawy i stanowi jego rozwinięcie oraz odpowiada sformułowanemu celowi 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 2 Autor dokonał przeglądu aktualnego stanu wiedzy. W pierwszej kolejności opisuje dotychczasowe dokonania w obszarze opracowania i właściwości różnych cieczy MR. Przedstawiono ich główne parametry oraz charakterystyki, a także pokazano różne możliwości zastosowań. Zamieszczono przykłady chwytaków, w których zastosowano taką ciecz.

Rozdział 3 zawiera między innymi cele, definicję obszaru i motywację podjęcia tematyki pracy oraz jej zakres.

Głównym celem naukowym pracy jest sprawdzenie możliwości zastosowania cieczy magnetoreologicznej, w konstrukcji nowego typu hybrydowego, miętko-sztywnego chwytaka, poprzez przeprowadzenie badań eksperymentalnych.

Hipoteza badawcza zakłada, że sterowanie za pomocą pola magnetycznego właściwościami cieczy magnetoreologicznej znajdującej się w poduszkach wykonanych z termoplastycznego poliuretanu, umiejscowionych na szczękach chwytaka, za pomocą mechanizmu składającego się z magnesu trwałego oraz sprężyn, zwiększy siłę wyciągania chwyconego obiektu, a tym samym poprawi udźwig chwytaka.

Rozdział 4 zawiera opis budowy i działania chwytaka z poduszkami wypełnionymi cieczą MR. Przystawiono możliwości zastosowania różnych źródeł pola magnetycznego w chwytaku robota. Wykonano badania rozkładu pola magnetycznego w poduszce. Opracowano modele MES obwodu magnetycznego poduszki chwytaka, dla różnych źródeł pola magnetycznego. Do badań użyto cztery źródła pola magnetycznego: dwa elektromagnesy i dwa uchwyty magnetyczne. Użyto elektromagnesy z cewkami, jeden z napięciem zasilania 12 VDC a drugi 24 VDC. Przeprowadzono analizę wpływu źródła pola magnetycznego na rozkład indukcji magnetycznej w obwodzie magnetycznym, a w szczególności w poduszce z cieczą MR. Przeprowadzone badania symulacyjne i eksperymentalne obwodu magnetycznego i konstrukcji chwytaka wykazały, że lepsze rezultaty można uzyskać przy zastosowaniu w poduszce magnesów trwałych. W szczególności, gdy ich masa była znacząco mniejsza od masy elektromagnesów. Wytypowano magnesy trwałe, które zapewniają chwytakom najlepsze działanie.

Rozdział 5 zawiera, opracowane przez Autora, modele poduszek wykonanych w technologii druku 3D wypełnionych cieczą MR. Autor zaproponował dwie geometrie poduszki. Pierwsza opierała się na strategii zapewnienia grubości ścian o szerokości trzech warstw w przekroju poprzecznym całego sklepienia. Druga

została zaprojektowana w oparciu o strategię zapewnienia równej grubości ścianki sklepienia, wynoszącej około 0,64 mm. Charakteryzuje się większą elastycznością, ale jest trudniejsza do wykonania. Ściany zbudowane są bowiem z dwóch warstw druku.

Zbudowano stanowisko pomiarowe, na którym przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych zagłębienia trzpienia w poduszce wypełnionej cieczą MR. Wykonano to w celu weryfikacji założeń teoretycznych oraz badań symulacyjnych, a także w celu sprawdzenia poprawności działania chwytaka. Badania te pozwoliły uzyskać informacje na temat wartości siły koniecznej do odkształcenia poduszki.

W celu oceny poduszek zamkniętych z powietrzem i z cieczą MR Autor zaproponował zastosowanie współczynnika adaptacyjności f_B . Jest to suma czterech ilorazów wartości siły nacisku i przemieszczenia trzpienia.

Rozdział 6 zawiera opis budowy chwytaka z poduszkami. Opisano stanowisko badawcze oraz wyniki badań sił wyciągania różnych obiektów ze szczęk chwytaka. W badaniach chwytania i wysuwania wykorzystano trzy obiekty. Ich przekroje to: okrąg o średnicy 24 mm, sześciokąt wpisany w okrąg o średnicy 24 mm skierowany ścianą boczną do poduszki i sześciokąt wpisany w okrąg o średnicy 24 mm skierowany krawędzią do poduszki.

Do porównania uzyskanych wyników badań Autor zaproponował zastosowanie wskaźnika siły wyciągania obiektu f_g na długości jego przemieszczenia.

Wykonano także badania chwytaka z poduszkami wypełnionymi cieczą MR i mikrokulkami, co spowodowało poprawę skuteczności działania chwytaka.

Rozdział 7 zawiera opis stanowiska do badań eksperymentalnych chwytaka z poduszkami MR na robocie kartezyjskim typu UR3e. W ramach wykonanych badań sił przenoszenia, przeprowadzono 16 pomiarów przenoszenia każdego obiektu, dla różnych konfiguracji przyspieszenia i prędkości ruchu robota. W sumie wykonano 576 testów działania chwytaka z wykorzystaniem robota. Wszystkie próby przenoszenia obiektów badanych zakończyły się sukcesem, osiągając 100 % skuteczność.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań.

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. Marcina Białka uważam:

1. Opracowanie elastycznej poduszki z cieczą MR, przeanalizowanie wariantu geometrii poduszki pod kątem zastosowania druku 3D i materiałów elastycznych. W ramach pracy, przedstawiono proces projektowania, wytwarzania oraz napełniania poduszek cieczą MR i szczegółowo podsumowano ich zastosowanie.
2. Przeprowadzenie badań symulacyjnych z wykorzystaniem pola magnetycznego i rozkładu tego pola w poduszce chwytaka, w stanie odkształcenia i braku odkształcenia poduszki.
3. Zaprojektowanie i wykonanie szczęk chwytaka z poduszkami z cieczą MR, które nie wymagają dodatkowego sterowania ani źródła zasilania. Konstrukcja szczęki wykorzystuje mechanizm sprężyna - magnes trwały z poduszką wykonaną z TPU, która wypełniona jest cieczą MR.
4. Zbudowanie kilku stanowisk do badania elastycznych poduszek z cieczą magnetoreologiczną i chwytaka szczękowego robota. Wykonanie analizy otrzymanych wyników badań.
 - 4.1. Stanowisko do badania poduszek wykonanych z różnych materiałów wypełnionych powietrzem i cieczami MR. Przeprowadzono badania siły potrzebnej do odkształcenia poduszki dla różnych jej wypełnień, geometrii i zastosowanych materiałów wykonania.
 - 4.2. Stanowisko do badania siły wyciągania obiektu ze szczęk o konstrukcji sztywnej i miękkiej. Przeprowadzono badania porównawcze różnych konstrukcji szczęk chwytaka, w celu wyboru najlepszego rozwiązania. Zbadano wpływ wprowadzenia pola magnetycznego do cieczy MR znajdującej się w poduszce. Zaproponowano wskaźnik siły wyciągania obiektu.
 - 4.3. Stanowisko do badań określenia skuteczności przenoszenia obiektów przez chwytak z poduszkami z cieczą MR zamocowanego na robocie UR3e. Przeprowadzono badania przenoszenia różnych obiektów, po określonej trajektorii, podczas których rejestrowano siłę nacisku szczęk na transportowany obiekt.

Na podstawie badań chwytaka z elastycznymi poduszkami z cieczą magnetoreologiczną określono ich skuteczność chwytania i przenoszenia obiektów. Dla niektórych poduszek zmierzono, że po zastosowaniu pola magnetycznego, siła potrzebna do wyciągnięcia obiektu ze szczęk, była dwa razy większa od siły występującej, gdy nie wprowadzono pola magnetycznego w objętość poduszki. Stwierdzono, że uzyskiwane siły wyciągania chwyconych obiektów ze szczęk z poduszkami MR, przez które przechodzi pole magnetyczne, są porównywalne z siłami występującymi przy zastosowaniu szczęk sztywnych. Ponadto, miękka poduszka adaptując się do kształtu obiektu, zwiększa powierzchnię styku.

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

5. Pytania szczegółowe

1. W badaniach zostały użyte poduszki wykonane w technologii druku 3D o średnicy podstawy wynoszącej 25 mm. Czy ta średnica podstawy poduszki powinna być stosowana do wszystkich przenoszonych obiektów?
2. Jak zmienia się temperatura elastycznych poduszek wypełnionych cieczą MR przy cyklicznej pracy chwytaka? Czy może mieć to wpływ na trwałość poduszki wykonanej w technologii druku 3D?
3. Proszę ocenić, czy czas uchwycenia i przeniesienia obiektów (czas całego cyklu operacji robota), przy użyciu chwytaka z elastycznymi poduszkami wypełnionymi cieczą MR, jest krótszy niż przy zastosowaniu innych chwytaków.
4. W podrozdziale 5.2 Autor, wykorzystując język programowania APDL i elementy HSF242, zamodelował ciśnienie wewnątrz poduszki chwytaka. Proszę podać wartości ciśnienia wewnątrz poduszki w zależności od zagłębienia trzpienia w poduszce.
5. W podrozdziale 6.4 w tabeli 11 Autor przedstawił wyniki badań siły wyciągania obiektu z chwytaka opisane w literaturze. Proszę o porównanie swoich wyników z rezultatami badań uzyskanymi przez innych autorów.
6. Czy były wykonane badania trwałościowe, wytrzymałościowe, zmęczeniowe poduszek chwytaków? Ile maksymalnie poduszki wykonały i wytrzymały cykli chwytania elementów (obiektów)? Czy technologia druku 3D jest odpowiednia do produkcji poduszek chwytaków robotów?

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 nich 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. Marcina Białka pt.: „Zastosowanie elastycznych poduszek z cieczą magnetoreologiczną w konstrukcji chwytaka szczękowego robota” (promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, w rozumieniu ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 30 sierpnia 2018 r. poz. 1668).

W związku z tym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Marcina Białka i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ryszard Jasiński

