

dr hab. inż. Jakub Bernat
Politechnika Poznańska
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Instytut Automatyki i Robotyki
ul. Piotrowo 3a
61-138 Poznań

Poznań, 01.09.2025

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Denysa Gutenki pod tytułem

„Koncepcja miękkiego chwytaka robota

z wykorzystaniem cieczy i elastomerów o własnościach programowalnych”

Recenzja została przygotowana w odpowiedzi na uchwałę nr 23/2025 Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechniki Krakowskiej z dnia 18.06.2025.

Informacje wstępne

W ramach pracy doktorskiej zostały przedstawione badania dotyczące miękkiego chwytaka wykonanego z elastomeru magnetoreologicznego wraz z analizą modelu oraz własności tego materiału. W pracy została postawiona teza: *„Możliwe jest opracowanie koncepcji miękkiego chwytaka z użyciem elastomerów magnetoreologicznych (magnetoaktywnych), mogącego realizować zadania związane z chwytem, manipulowaniem obiektów o różnych wymiarach i kształtach”*. W pracy przedstawiono 6 rozdziałów na 123 stronach. W pierwszym rozdziale zostało omówione wprowadzenie wraz z przeglądem literatury. W drugim omówiono model mikromechaniczny, w trzecim i czwartym badanie magnetoreologicznych charakterystyk (tryb rozciągania, ściskania i pola aktywnego), a w piąty przedstawia koncepcję wraz z weryfikacją miękkiego chwytaka. Praca w ogólności posiada spójny charakter i przedstawia kluczowe aspekty wymagane w rozprawie doktorskiej.



Prezentowanie tematyki rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy miękkiej robotyki tematu szeroko omawianego w literaturze z ostatnich lat. Miękka robotyka łączy zagadnienia inżynierii materiałowej, projektowania i optymalizacji geometrii urządzeń oraz zagadnień sterowania. Przedstawione w rozprawie rozważania w pełni dotyczą wyżej wymienionych tematów. Kluczowy punkt rozprawy doktorskiej, czyli koncepcja nowego chwytaka jest problemem stawianym od dziesięcioleci w robotyce. Przedstawione zagadnienia wymagały przeprowadzenia eksperymentów z robotyki, co wymaga od Autora rozprawy wiedzy z konstrukcji układów robotycznych, a także systemów sensorycznych.

Dodatkowo poruszono problemy analizy charakterystyki elastomeru magnetoreologicznego. Przedstawiona w pracy tematyka wymaga umiejętności praktycznych oraz teoretycznych związanych z robotyką, a po części inżynierią materiałową. Warto podkreślić, że sformułowane zagadnienia mają charakter badawczy, a wyniki w szczególności modelowania mogą być wykorzystane w dalszych pracach.

Opis rozdziałów pracy

W ramach wstępu przedstawiono podstawowe własności elastomeru magnetoreologicznego oraz jego zastosowania. W pierwszych podrozdziałach omówiono proces produkcji oraz charakterystykę materiału, takiej jak zmiana własności mechanicznych pod wpływem pola, czy efekt magnetostrykcji. W szczególności porównano własności elastomeru magnetoreologicznego do cieczy magnetoreologicznej. W kolejnych podrozdziałach omówiono zastosowania elastomeru magnetoreologicznego w aplikacjach komercyjnych, jak i propozycjach znanych w literaturze naukowej. W ostatniej części rozdziału przedstawione są w sposób poprawny zadania badawcze Doktoranta oraz teza pracy. Podsumowując rozdział przedstawia kluczowe aspekty materiału oraz jego zastosowanie. Literatura uzasadniająca treść tego rozdziału została dobrana z uznanych międzynarodowych czasopism i książek z ostatnich lat. W szczególności bardzo dobrze zostało przedstawione porównanie do cieczy magnetoreologicznej. Aspektem dyskusyjnym jest niewielkie porównanie elastomerów magnetoaktywnych (inna nazwa elastomeru magnetoreologicznego) tzw. miękkich lub twardych (Mehdi Eshaghi, Mohsen Ghasemi, Korosh Khorshidi, *Design, manufacturing and applications of small-scale magnetic soft robots, Extreme Mechanics Letters, Volume 44, April*



2021, 101268, <https://doi.org/10.1016/j.eml.2021.101268>). Dotyczy to zarówno produkcji, własności jak i zastosowań.

Rozdział „Model mikromechaniczny” omawia sposoby modelowania elastomeru magnetoreologicznego. Przedstawione są podstawowe typy modelu: mikromechaniczne, fenomenologiczne i konstytutywne m. in. na podstawie pracy *Saber, A. and Sedaghati, R. (2023), The Modeling of Magnetorheological Elastomers: A State-of-the-Art Review. Adv. Eng. Mater., 25: 2300182*. W pracy rozważane są dwa modele mikromechaniczne. Pierwszy rozważany jest model statyczny uwzględniający zjawiska fizyczne dla reprezentatywnego wycinka objętości. Doktorant przedstawił dokładną analizę sił oraz naprężenia w materiale, dzięki któremu uzyskał wynik odnośnie zmiany modułu Younga w zależności od parametrów osnowy oraz wypełnienia. Drugi rozważany model uwzględnia także zmianę położenia drobin żelaza w osnowie. W omawianym rozdziale obliczenia zostały poparte przykładowymi symulacjami.

W rozdziale 3 pt. „Badanie magnetomechanicznych charakterystyk MRE – tryb rozciągania” przedstawiono budowę aparatury niezbędnej do badania charakterystyki siły od rozciągnięcia. Przedstawiona aparatura stanowi autorską koncepcję urządzenia, która umożliwia badanie próbek materiału MRE w polu magnetycznym. W rozdziale przedstawiono oszacowanie średniej wartości pola magnetycznego w próbce materiału za pomocą oprogramowania FEMM. W treści rozdziału przedstawiono testy MRE z zawartością objętościową 26% oraz 30% żelaza. Dla wyznaczonych charakterystyk przedstawiano modele fenomenologiczne oraz zidentyfikowane ich parametry. W szczególności uwzględniono modele Kelvina–Voigta, Bouc-Wen’a, Dahla przedstawiając na rysunkach odpowiednio Rys. 3.7, 3.8, 3.9 wyniki symulacji modelu oraz eksperymentu. W kolejnej części rozdziału porównano model Dahla według wskaźnika jakości. Pytanie dyskusyjne, dlaczego w Tabeli 3.3 nie uwzględniono pozostałych opracowanych modeli. Podsumowując rozdział przedstawia dokładne rozważania na temat modelowania materiału MRE w trybie rozciągania prezentując różnorodne modele liniowe oraz nieliniowe.

Kolejny rozdział dotyczy przedstawienia rezultatów badania magnetomechanicznych charakterystyk MRE w trybie aktywnym i ściskania. W celu przeprowadzenia badań zbudowano autorskie stanowisko laboratoryjne umożliwiające zadanie ściśnięcia materiału, wartości pola magnetycznego oraz pomiaru siły oddziałującej na materiał. W ramach prac

przedstawiono badania różnych próbek MRE ze względu na charakterystyki naprężenie względem pola magnetycznego przy stałym rozciągnięciu oraz naprężenie względem rozciągnięcia przy stałym polu magnetycznym. Badano między innymi wpływ różnego stężenia żelaza w próbce, różnego rodzaju osnowy, wysokości próbki MRE. Dla większości badanych modeli określono model matematyczny opisujący zmierzoną eksperymentalnie charakterystykę. Pewnym brakiem jest niewykonanie większej liczby powtórzeń przy badanych próbkach, czy powiązanie modelu mikromechanicznego opisującego wpływ różnego stężenia żelaza dla badań przedstawionych w tym rozdziale.

W ostatnim rozdziale zostaje omówiona autorska koncepcja wraz z weryfikacją chwytaka magnetoreologicznego. Zaproponowana budowa chwytaka posiada membranę MRE o sześciokątnym kształcie nałożoną na elektromagnes. Aktywacja pola magnetycznego w elektromagnesie prowadzi do zaciśnięcia się membrany. W rozdziale omówiono koncepcję budowy chwytaka, jej możliwe stany oraz wprowadzenie modyfikacji w celu stabilizacji pracy. Koncepcja chwytaka z wykorzystaniem materiału MRE jest nowatorska i niespotkana wcześniej w literaturze. W kolejnej części rozdziału przedstawiono testy chwytaka pracującego bez trzymanego obiektu, dla różnych wielkości sześcianu oraz cylindra. W ramach testów badano zmiany kształtu chwytaka oraz pola magnetycznego wokół elektromagnesu. Testy potwierdzają poprawne działanie chwytaka i jego możliwość adaptacji do kształtu obiektu. Mankamentem omawianych badań jest nie przedstawienie testów z różnorodnymi obiektami (np. użytku codziennego), czy testy względem udźwigu.

Uwagi krytyczne o charakterze edycyjnym:

- 1) Literówki w słowach, nazwach, na przykład (str. 71, str. 72): *EcoFlux*
- 2) Brak nawiasu w wyrażeniu (str. 63): *na Rys. 4.3*
- 3) Zgubiony kontekst zdania (str. 69): *Rozważmy najpierw wyniki uzyskane dla tej próbki.*

Uwagi krytyczne o charakterze dyskusyjnym:

- 1) Autor w rozdziale 1.3 stwierdza „*Ponadto należy rozważyć, czy materiał cząsteczek jest magnetycznie miękki czy twardy. Efekt magnetoreologiczny w materiale typu MRE, w którym zastosowano materiał magnetycznie miękki, jest odwracalny po namagnesowaniu [22]; w ogólnym przypadku zaleca się stosowanie materiałów magnetycznie miękkich do produkcji MRE. Jest to zalecenie dotyczące także cieczy*



MR.”. W zastosowaniach miękkiej robotyki w elastomerach bardzo często stosowane są materiały magnetycznie twarde na przykład w pracy *Mehdi Eshaghi, Mohsen Ghasemi, Korosh Khorshidi, Design, manufacturing and applications of small-scale magnetic soft robots, Extreme Mechanics Letters, Volume 44, April 2021, 101268, <https://doi.org/10.1016/j.eml.2021.101268>*.

- 2) W pracy przedstawiono interesujące eksperymenty odnośnie materiału MRE. Jednak pytanie, czy uzyskane wyniki, w szczególności testy materiału MRE (rozdział 3 oraz 4) umożliwiają połączenie z wzorami uzyskanymi dla modelu mikromechanicznego z różną zawartością żelaza.
- 3) W wzorze 4.1 warto dodać interpretację czy ściskanie powoduje, że odkształcanie ma wartość dodatnią, czy ujemną. Wyrażenia przedstawione we wzorze 4.1 oraz na rysunku 4.6 związane z przemieszczeniem warto przedstawić na schemacie w celu wizualizacji kierunku ruchu.
- 4) W rozdziale 3 oraz 4 brakuje odniesienia do literatury. W pracy uzyskano bardzo dużo wyników eksperymentalnych odnośnie materiałów MRE. Pytanie, czy uzyskane w tym doktoracie charakterystyki elastomeru magnetoreologicznego porównano do wyników z badań dostępnych w literaturze np. *Holger Bose, Thomas Gerlach and Johannes Ehrlich, Magnetorheological elastomers - An underestimated class of soft actuator, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 32, Iss. 14, 2021, 10.1177/1045389X21990888*.
- 5) W rozdziale 3 oraz 4 brakuje w ogólności komentarza odnośnie statystyk z uzyskanych charakterystyk. Czy przedstawione wykresy były wykonywane pojedynczo, czy kilkakrotnie, a potem wykonywano uśrednienie?
- 6) W rozdziale 3 oraz 4 przedstawiono charakterystyki mechaniczne magnetoreologicznego elastomeru. W literaturze dla omawianych badań określone są dwa rodzaje naprężeń – inżynierskie oraz rzeczywiste. Czy przedstawione naprężenia (np. Rys. 4.25.) wyrażają naprężenie inżynierskie, czy rzeczywiste?
- 7) W rozdziale 5 *Koncepcja miękkiego chwytaka*, przedstawiono testy z użyciem sześciokąta oraz walca. Pytanie, czy były próby z obiektami o różnorodnej geometrii (np. codziennego użytku)? W tym rozdziale przedstawiono także testy ze względu na objętość obiektów. Pytanie, czy wykonano testy odnośnie różnej masy obiektów?

Bibliografia

Rozważania w przedstawionej rozprawie poparte są 103 pozycjami literatury. Tematyka bibliografii szczegółowo odnosi do zagadnień omawianych w literaturze (np. [83] Amin Saber i Ramin Sedaghati. „The modeling of magnetorheological elastomers: A state-of-the-art review”. W: *Advanced Engineering Materials* 25.16 (2023), s. 2300182.). Autor przedstawia zagadnienia w rozprawie uwzględniając własne prace, dokładniej 7 publikacji autorskich lub współautorskich. Na szczególne wyróżnienie zasługuje praca:

[93] Denys Gutenko, Paweł Orkisz i Bogdan Sapiński. „Laboratory Testing and Modelling of Magnetorheological Elastomers in Tension Mode”. W: *Acta Mechanica et Automatica* 18.2 (2024), s. 291–299. DOI: 10.2478/ama-2024-0032

przedstawiająca nowe koncepcje z punktu widzenia badań eksperymentalnych nad magnetoreologicznymi elastomerami.

Podsumowanie

W recenzowanej rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienie konstrukcji miękkiego chwytaka wykonanego z magnetoreologicznego elastomeru. Analiza chwytaka została poprzedzona dokładnym badaniem własności elastomeru magnetoreologicznego oraz jego modelowaniem. Uważam, że w pracy za osiągnięcie autorskie można wyróżnić opracowanie nowej koncepcji chwytaka miękkiego. Przedstawiona koncepcja nie była wcześniej analizowana w literaturze i stanowi ciekawy temat dalszych badań. W ogólności praca bardzo dokładnie omawia temat modelowania magnetoreologicznego elastomeru, używając do tego trudnego modelu mikromechanicznego. W pracy przedstawiono także szereg eksperymentów uzasadniających badania teoretyczne. W związku z tym uważam, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” przedstawione w artykule 187 oraz wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Jakub Bernat