

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Denysa Gutenko
pt. Koncepcja miękkiego chwytaka robota z wykorzystaniem cieczy i elastomerów o własnościach programowalnych

Podstawą do sporządzenia niniejszej recenzji jest uchwała z dnia 18.06.2025 r. Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej.

Ocena tematyki i zakresu badań

Recenzowana praca opisuje obszerne badania nad elastomerami magnetoreologicznymi (MRE), materiałami inteligentnymi reagującymi na pola magnetyczne. Opis obejmuje zarówno modelowanie mikromechaniczne statyczne i dynamiczne, szczegółowo opisując zachowanie tych materiałów w różnych warunkach obciążenia, jak i badania eksperymentalne w trybach rozciągania, ściskania oraz aktywnego pola magnetycznego. Autor zajmował się również identyfikacją parametrów modeli fenomenologicznych, w tym modyfikacją modelu Dahla, w celu lepszego dopasowania do danych doświadczalnych. Te rozważania teoretyczne pozwoliły stworzyć koncepcję oraz zbudować i zbadać prototyp miękkiego chwytaka MRE, który wykazał zdolność do manipulowania obiektami o zróżnicowanych kształtach i rozmiarach poprzez zmienną sztywność indukowaną polem magnetycznym. W moim przekonaniu tematyka badań podjętych przez Autora pracy jest ważna i aktualna. Ma istotne aspekty zarówno teoretyczne jak i praktyczne.

Tradycyjne roboty sztywne często mają trudności z operowaniem obiektami o zróżnicowanych kształtach i wymiarach bez konieczności wymiany efektora. Ponadto, ich sztywna konstrukcja może stwarzać ryzyko uszkodzenia obiektów oraz utrudniać bezpieczny kontakt z ludźmi. Odpowiedzią na te wyzwania jest robotyka miękka, wykorzystująca materiały elastyczne. Jednymi z nich są elastomery magnetoreologiczne (MRE), które zmieniają swoje właściwości w kontrolowany sposób pod wpływem bodźców zewnętrznych. MRE są szczególnie obiecujące w miękkiej robotyce ze względu na ich zdolność do szybkiej i odwracalnej zmiany sztywności, tłumienia lub kształtu pod wpływem pola magnetycznego. MRE mogą być częścią adaptacyjnych elementów wykonawczych (siłowników), które zmieniają swój kształt lub zachowanie pod wpływem pola magnetycznego, umożliwiając drobne lub duże odkształcenia, zmianę kierunku ruchu, drgania, oscylacje i deformacje sterowane polem magnetycznym. Pozwala to na adaptację do różnych środowisk lub tworzenie robotów biomimetycznych. W szczególności wykorzystanie MRE może umożliwiać projektowanie robotów elastycznych, bezpiecznych w kontakcie z ludźmi. To, że MRE mogą zmieniać swoje właściwości elektryczne lub mechaniczne w reakcji na siłę zewnętrzną i pole magnetyczne, otwiera możliwości ich wykorzystania jako inteligentnych sensorów, redukując liczbę czujników w systemie robotycznym i upraszczając jego strukturę.

Mimo znaczących postępów w badaniach nad składem, wytwarzaniem, trwałością i optymalizacją MRE, wiele aspektów ich zachowania pozostaje niedostatecznie poznanych. Dotyczy to zwłaszcza możliwości sterowania sztywnością lub deformacjami materiału w warunkach dynamicznych lub quasi-statycznych. Doktorat wpisuje się w ten nurt badań podejmując próbę stworzenia modeli mikromechanicznych (statycznych i dynamicznych), które pomogą zrozumieć i ilościowo opisać procesy fizyczne zachodzące w MRE pod wpływem bodźców magnetycznych i mechanicznych, przeprowadzenie badań doświadczalnych próbek MRE

w różnych trybach pracy (rozciągania, ściskania, pola aktywnego) z wykorzystaniem zaprojektowanych stanowisk badawczych, opracowanie modeli fenomenologicznych i parametrycznych do ilościowego opisu zachowania MRE, w tym modyfikację modelu Dahla i analizę histerezy i wreszcie budowę prototypu miękkiego chwytaka MRE zdolnego do manipulowania obiektami o różnych wymiarach i kształtach oraz przeprowadzenie badań jego funkcjonalności z obiektami o różnej geometrii, a także opracowanie bezdotykowej metody oceny działania chwytaka na podstawie danych wizyjnych.

Autor pracy stawia poprawną, ale dość oczywistą tezę, pisząc na stronie 17: „Możliwe jest opracowanie koncepcji miękkiego chwytaka z użyciem elastomerów magnetoreologicznych (magnetoaktywnych), mogącego realizować zadania związane z chwytem, manipulowaniem obiektów o różnych wymiarach i kształtach.” Pisząc o oczywistości tej tezy nie podważam wartości pracy, bo jakkolwiek uważam, że każde stwierdzenie typu „możliwe jest opracowanie urządzenia X” daje się eksperymentalnie udowodnić, to jednak sztuką, opanowaną przez Autora pracy, jest wykonanie takiego projektu w oparciu o solidne podstawy teoretyczne i uzyskanie efektu, który nie tylko „jakoś” działa, ale realizuje określone, założone cele w sposób poprawny i efektywny. Dlatego też uważam, że znacznie bardziej istotne niż teza są wyliczone w rozdziale 1.7 cele badawcze, które zostały przez Autora wyznaczone i zrealizowane:

1. Zaproponowanie modelu mikromechanicznego materiału MRE celem zrozumienia zjawisk rządzących jego zachowaniem,
2. Przeprowadzenie symulacji numerycznych zachowania elastomeru MR z użyciem zaproponowanego modelu mikromechanicznego w wybranych trybach pracy,
3. Wytworzenie próbek elastomerów MR i pomiar charakterystyk namagnesowania otrzymanych próbek,
4. Zaprojektowanie i budowę stanowisk pomiarowych służących realizacji badań z użyciem wytworzonych próbek MRE i chwytaka,
5. Wyznaczenie charakterystyk magnetomechanicznych elastomerów MR w wybranych trybach pracy (rozciągania, ściskania, pola aktywnego),
6. Opracowanie koncepcji chwytaka MRE, wykonanie modelu CAD chwytaka, jego budowę i badania doświadczalne,
7. Zaproponowanie bezdotykowej metody pomiarowej służącej ocenie prawidłowości działania chwytaka.

Zdefiniowanie tych celów i ich opisana w pracy realizacja świadczą o dojrzałości Autora jako badacza i inżyniera oraz decydują o tym, że praca jest wartościowym wkładem w dyscyplinę naukową AEEiTK.

Treść rozprawy

Rozprawa składa się z 6 rozdziałów: wprowadzenia (1), opisu modelu mikromechanicznego (2), opisu badań charakterystyk magnetomechanicznych przy rozciąganiu (3) w polu aktywnym i przy ściskaniu (4), opisu koncepcji, budowy i badań chwytaka (5) oraz podsumowania (6). Autor rozpoczął pracę od przeglądu literatury na temat materiałów inteligentnych, w szczególności cieczy i elastomerów MRE, oraz ich zastosowań w różnych dziedzinach, w tym w robotyce. Na podstawie tej analizy sformułowano cele i tezy badawcze.

W celu zrozumienia zjawisk rządzących zachowaniem elastomerów MRE, opracowano dwa modele mikromechaniczne (statyczny i dynamiczny), opisujące ich zachowanie w obecności zewnętrznego pola magnetycznego. Przeprowadzono symulacje numeryczne w środowisku MATLAB, analizując zachowanie elastomerów w trybie ściskania i rozciągania, oraz zbadano wpływ wybranych parametrów modeli na ich zachowanie. Wyniki symulacji potwierdziły, że sztywność materiału wzrasta wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego lub indukcji magnetycznej.

Kolejne części rozprawy koncentrują się na badaniach doświadczalnych MRE w trybach rozciągania, ściskania i pola aktywnego. Dla trybu rozciągania zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, wytworzono próbki elastomerów i wykorzystano je w badaniach. Symulacje

uzupełniono fenomenologicznym modelem Dahla, który został wybrany po analizie popularnych modeli histerezy. Opracowano algorytm identyfikacji parametrów modelu chwytaka robota z wykorzystaniem elastomerów o programowalnych własnościach i zaimplementowano go w MATLABie. Obliczenia wykazały istotny wzrost współczynnika sztywności i tłumienia. Oryginalny model zmodyfikowano, zastępując człon liniowy funkcją tangens, aby uwzględnić nieliniowe charakterystyki siła-przemieszczenie. Przedstawione w pracy wyniki wskazują, że zmodyfikowany model lepiej odwzorowuje dane eksperymentalne z silną nieliniowością, choć jest mniej skuteczny dla danych liniowych. Dla trybów ściskania i pola aktywnego zaprojektowano i wykonano dedykowane stanowisko badawcze (komórkę magnetyczną). Umożliwiło to precyzyjne sterowanie natężeniem pola magnetycznego oraz siłą oddziałującą na próbkę. Przeprowadzono symulacje magnetostatyczne w FEMM 4.2 w celu analizy rozkładu strumienia magnetycznego. W trybie pola aktywnego wykonano testy statyczne i dynamiczne z wymuszeniami skokowymi i sinusoidalnymi. Zaproponowano model parametryczny, oparty na modelu mikromechanicznym, który zweryfikowano eksperymentalnie, pokazując zależność parametrów od natężenia pola magnetycznego. Testy ściskania z wymuszeniami piłokształtnymi i sinusoidalnymi wykazały nieliniowość rosnącą wraz ze wzrostem amplitudy wymuszenia oraz brak istotnych zmian w zależności od częstotliwości w analizowanym zakresie. Ten model parametryczny również dobrze zgadzał się z danymi eksperymentalnymi.

W piątym rozdziale pracy opisano projekt i wykonanie prototyp miękkiego chwytaka z MRE oraz opracowane dedykowane stanowisko testowe. Wyniki wykazały liniową zależność indukcji magnetycznej od natężenia prądu z minimalną histerezą. Zbadano dynamiczną reakcję chwytaka na szybkie zmiany prądu, uzyskując czasy odpowiedzi (otwierania i zamykania) rzędu 0.1–0.2 sekundy. Chwytnik przetestowano pod kątem manipulowania obiektami o różnych kształtach i wymiarach, a na podstawie wyników określono wartości prądu niezbędne do chwytania i zwalniania obiektów.

Ostatni rozdział pracy krótko ją streszcza, po czym wylicza kluczowe, zdaniem Autora pracy, osiągnięcia: opracowanie modeli mikromechanicznych (statycznego i dynamicznego), modyfikację modelu Dahla, zaprojektowanie stanowisk badawczych, zaproponowanie modeli parametrycznych dla różnych trybów pracy, a także opracowanie koncepcji chwytaka MRE, jego prototypu i metody oceny działania. Rozdział ten kończy propozycja dalszych badań, a więc budowa systemu sterowania chwytakiem, dalsze wykorzystanie metody oceny pola przesłony z danych wizyjnych, optymalizacja konstrukcji w celu zmniejszenia poboru energii oraz wszechstronne badania siły nacisku i udźwigu.

Ogólne uwagi do pracy

W pracy doktorskiej mgr. inż. Denysa Gutenki można wskazać kilka błędów, niedociągnięć oraz obszarów wymagających dalszych usprawnień lub pogłębienia badań, co zresztą rozumie Autor pracy. Nie zmienia to mojej pozytywnej oceny, która wynika z udowodnienia głównej tezy rozprawy i zrealizowania celów badawczych. Chciałbym jednak zwrócić uwagę na następujące zagadnienia, które warto byłoby przedyskutować:

1. Ograniczenia modeli mikromechanicznych i dynamicznych:
 1. W modelowaniu dynamicznym w trybie ściskania, ze względu na trudności w uzyskaniu stabilnego rozwiązania układu równań różniczkowych, uproszczono model poprzez zaniechanie przyspieszeń cząsteczek oraz siły grawitacji. Może to wpływać na precyzję opisu rzeczywistego zachowania materiału.
 2. W badaniach trybu pola aktywnego zaobserwowano rozbieżność między wynikami modelowania (które przewidywało ściskanie próbki pod wpływem pola magnetycznego) a wynikami laboratoryjnymi (gdzie próbka rozciągała się). Tę rozbieżność autor wyjaśnia wpływem dodatkowej siły przyciągania próbki do elektromagnesu w komórce magnetycznej, co oznacza, że model nie uwzględniał wszystkich istotnych sił działających w warunkach eksperymentalnych (por. uwaga 2.3).
2. Ograniczenia modeli fenomenologicznych:

1. Zmodyfikowany model Dahla, choć lepiej odwzorowuje dane eksperymentalne wykazujące silną nieliniowość, jest mniej skuteczny w przypadku danych o charakterze liniowym. Badania wykazały, że dla próbek MRE bez pola magnetycznego, gdzie nieliniowość jest słabiej wyrażona, prostszy model Dahla bez modyfikacji opisywał dane lepiej. Modyfikowany model Dahla, który uwzględnia nieliniowość poprzez funkcję tangens, jest mniej skuteczny w przypadku danych o charakterze liniowym. Otrzymane wartości błędu kwadratowego były mniejsze dla prostszego modelu bez nieliniowości, gdy badane próbki MRE nie były poddane działaniu pola magnetycznego, co świadczy o słabszej zdolności zmodyfikowanego modelu do opisywania zachowań zbliżonych do liniowych. Czy Autor ma pomysł, jak rozwiązać ten problem?
2. W przypadku modelu parametrycznego dla trybu ściskania, wyniki obliczeń były niezadowolające dla wymuszeń o amplitudzie 1.5 mm. W przypadku modelu parametrycznego dla trybu ściskania (wzór 4.9), wyniki obliczeń były niezadowolające dla wymuszeń o amplitudzie 1.5 mm. Wskazuje to na granice stosowności lub dokładności tego modelu dla większych odkształceń. Jak można model poprawić?
3. We wzorze (2.50), parametr σ_{msr} powinien opisywać przewagę sił ściskających lub rozciągających. W modelowaniu mikromechanicznym z Rozdziału 2, pod wpływem pola magnetycznego przyłożonego w kierunku osi, próbka powinna ulegać ściskaniu. Jednak w warunkach laboratoryjnych zaobserwowano, że próbka rozciągała się. Autor wyjaśnia to wpływem dodatkowej siły przyciągania próbki do elektromagnesu w komórce magnetycznej, co oznacza, że model nie uwzględniał wszystkich istotnych sił zewnętrznych działających w eksperymencie. To jest istotne niedociągnięcie w kompletności modelu.
3. Ograniczenia prototypu chwytaka i testów:
 1. Chwytnik cechuje się stosunkowo dużym zapotrzebowaniem energetycznym i niezbędne są dalsze prace w celu zmniejszenia tego poboru.
 2. W przypadku chwytania obiektów sferycznych, tylko najmniejsza próbka o średnicy 25 mm mogła zostać uchwycona. Większe obiekty sferyczne były wypychane i ześlizgiwały się po powierzchni płaszcza. Sugeruje to zmianę konstrukcji elementu chwytającego.
 3. W przypadku chwytania obiektów sześciennych, najmniejszy obiekt o średnicy 25 mm nie mógł być uchwycony, co także uzasadnia konieczność poprawy elementu chwytającego.
 4. W sekcji podsumowującej badania chwytaka Autor wyraźnie zaznacza, że testy udźwigu były poza zakresem przewidzianych badań, co stanowi istotne niedociągnięcie w pełnej charakterystyce możliwości urządzenia. Dobrze więc, że planowane są wszechstronne badania siły nacisku i udźwigu w ramach dalszych prac.
 5. Obserwacje pola powierzchni chwytaka wykazały, że ocena pracy na podstawie pomiaru tylko długości przekątnych jest niewystarczająca, optymalna jest ocena pola powierzchni przesłony. Stwierdzono, że zmiana długości przekątnych chwytaka jest nierównomierna, co wynika z jego nieidealnej symetrii osiowej.
4. Wyzwania związane z materiałami MRE:
 1. Niska przenikalność magnetyczna MRE wymaga wytwarzania silnych pól magnetycznych, co utrudnia miniaturyzację urządzenia i precyzyjną kontrolę w czasie rzeczywistym ze względu na nieliniowość i histerezę.
 2. Wytworzone próbki MRE zawierały pęcherzyki powietrza, których nie udało się całkowicie wyeliminować na etapie produkcji, choć ich liczba nie była na tyle duża, aby wykluczyć materiał z dalszych badań.

Te punkty wskazują na obszary, które stanowią wyzwania w obecnym etapie rozwoju technologii MRE lub specyficzne ograniczenia opracowanego prototypu i modeli. Treść pracy wskazuje, że

Autor zdaje sobie sprawę z tych problemów, ale dobrze byłoby podać ich priorytet i zasugerować sposób rozwiązania niektórych z nich (np. 3.1-3.4).

Uwagi o charakterze szczegółowym

Napotkałem przy lekturze pracy nieliczne niezręczności w oznaczeniach i literówki, które utrudniają zrozumienie toku myślenia Autora. Zamieszczone tutaj uwagi krytyczne nie dezawuuują wartości rozprawy. Moim celem jest zwrócenie uwagi na niedostatki, które na pewno można łatwo wyeliminować w kolejnych publikacjach.

Oznaczenia we wzorze (2.1) nie są najszcześliwsze: symbole μ_0 i μ_1 oraz m_0 i m_1 choć są w pracy formalnie zdefiniowane – m_0 i m_1 to momenty magnetyczne cząsteczek o indeksach 0 i 1, a μ_0 to przenikalność magnetyczna próżni, zaś μ_1 to względna przenikalność magnetyczna ośrodka, to użycie tych samych indeksów (0 i 1) może być źródłem nieporozumień i pomyłek w szybkim czytaniu. Jest to kwestia niefortunnej notacji (rozsądniej byłoby posłużyć się powszechnie przyjętym symbolem μ_r), a nie błędu merytorycznego w definicjach.

We wzorze (2.1) i jego otoczeniu, $\vec{r}$ jest zdefiniowany jako wektor odległości między cząsteczkami, a $|r|$ jako odległość międzycząsteczkowa. Później jednak, w opisie reprezentatywnego elementu objętościowego (RVE), r jest używane jako długość krawędzi RVE. Choć kontekst zazwyczaj jasno wskazuje, o które r chodzi, użycie tego samego symbolu dla dwóch różnych wielkości (odległość między cząsteczkami w ogólnym sensie i długość krawędzi elementu objętościowego) może prowadzić do nieporozumień.

Ponadto, $\vec{r}$ jest zdefiniowane jako „wektor odległości”, ale w kolejnych wyprowadzeniach, np. $\vec{r}_{01} = (0; 0; -1)$, jest ono używane jako wektor jednostkowy (wersor), co jest bardziej precyzyjne dla obliczeń iloczynów wektorowych. Precyzja w definicji $\vec{r}$ jako wektora jednostkowego byłaby wskazana.

We wzorach (3.9) i (3.10) służących do oceny błędu (J_{es1} , J_{es2}), symbol $F_{mx(exp)}$ (siła mechaniczna z eksperymentu) pojawia się dwukrotnie w nawiasie dla różnicy. Prawdopodobnie drugie wystąpienie powinno odnosić się do wartości siły mechanicznej otrzymanej z symulacji ($F_{mx(sim)}$), tak jak to jest w formule (3.8). Jest to błąd typograficzny.

Rysunek 3.3 ma podwójne oznaczenie „a)”: „a) próbka o zawartości obj. Fe 25%, a) próbka o zawartości obj. Fe 30%”. Powinno być „a) ... 25%, b) ... 30%” lub podobne rozróżnienie dla dwóch obrazów.

W modelowaniu statycznym, dla uproszczenia przyjęto, że siły oddziaływania magnetycznego rozkładają się równomiernie. W rzeczywistości ten rozkład może być bardziej złożony.

W opisie osi rzędnych na rysunkach 2.15-2.20 pojawia się czas – należałoby wyjaśnić, jaką rolę pełni on, skoro obliczenia wykonano dla modelu statycznego. Zwłaszcza, że rysunki zdają się wskazywać na zależność odkształcenia i naprężeń od czasowej pochodnej indukcji magnetycznej.

W porównaniu modeli statycznego i dynamicznego (podrozdział 2.4.1), jednym z warunków było założenie, że siła oddziaływania magnetycznego jest niezależna od odkształcenia próbki MRE ($F_{Magi(hi)} = const$). Chociaż później autor bada wpływ zależności od odkształcenia, to to początkowe założenie jest uproszczeniem dla celów porównawczych.

Poza wymienionymi uwagami w tekście napotyka się na nieliczne niezręczności gramatyczne/stylistyczne, ale mają one charakter trzeciorzędny. W niektórych przypadkach odniesienia do literatury pojawiają się w nietypowych miejscach w zdaniu, np. w środku frazy. W akapicie dotyczącym składu cieczy MR, stwierdzenie: „W przypadku cieczy MR cząsteczki ferromagnetyczne znajdują się w *cieczy nośnej*” powinno brzmieć „w *cieczy nośnej*” (odpowiednia forma miejscownika), w kilku miejscach w tekście używany jest rzeczownik w dopełniaczu zamiast przymiotnika, np. „cząsteczka ferromagnetyka” zamiast bardziej naturalnego „cząsteczka ferromagnetyczna”. Chociaż jest to zrozumiałe, forma przymiotnikowa jest często preferowana w języku naukowym.

Powyższe uwagi wskazują na obszary, które mogłyby zostać poprawione w celu zwiększenia przejrzystości, spójności i profesjonalizmu dokumentu, ale jeszcze raz podkreślam, że nie mają istotnego wpływu na bardzo pozytywną ocenę rozprawy.

Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że wszystkie zamieszczone powyżej uwagi krytyczne mają na celu wsparcie Autora na początku jego, mam ogromną nadzieję, wypełnionej sukcesami kariery naukowej. Nie wpływają one na bardzo pozytywne wrażenie i przekonanie o dużych kompetencjach, wiedzy i pracowitości Pana Denysa Gutentko. Stwierdzam, że jego rozprawa doktorska „Koncepcja miękkiego chwytaka robota z wykorzystaniem cieczy i elastomerów o własnościach programowalnych” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami. W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie tej rozprawy i dopuszczenie mgr. inż. Denysa Gutenko do publicznej obrony.

Janek Staryśko