

Dr hab. inż. Andrzej Sobczyk  
prof. emerytowany Politechniki Krakowskiej  
Osiedle Akademickie 5/16  
31-866 Kraków  
tel. 606120458  
e-mail: andrzej.sobczyk@pk.edu.pl

Kraków, dn. 15.10.2021 r.

**R E C E N Z J A**  
**pracy doktorskiej**  
**mgr inż. Karola Musiałka**  
**pt. „SPRZĘGŁO HYDRAULICZNE Z MAGNETOREOLOGICZNĄ CIECZĄ**  
**ROBOCZĄ I WIRUJĄCYM POLEM MAGNETYCZNYM ”**

Promotor: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kęsy  
Promotor pomocniczy: dr inż. Aneta Mikulska

**1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Karola Musiałka było pismo J.M Rektora Pana Prof. dr hab. Sławomira Bukowskiego, nr PK-042/35/46-1/dr-r/2021, z dnia 26 sierpnia 2021 r., w oparciu o Uchwałę Nr 000-12/5/2021 Senatu Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Puławskiego, z dnia 30 czerwca 2021 r.

**2. Przedmiot recenzji i ogólna charakterystyka zawartych treści w poszczególnych rozdziałach pracy**

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska zawiera w kolejności: wykaz najważniejszych oznaczeń, wstęp, 5 ponumerowanych rozdziałów, wnioski ogólne, spis literatury – 93 pozycje, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz załącznik – zapisane łącznie na 126 stronach.

Zastosowane w sprzęgle jako cieczy roboczej, ciecz magnetoreologiczną, jest ogólnie znane, i ze względu na swoje właściwości, polegającej na możliwości zmiany charakterystyki przeniesionego momentu pod wpływem działania pola magnetycznego znajdują zastosowanie w układach napędu i sterowania maszyn, szczególnie tam gdzie chcemy uniknąć sztywnego połączenia pomiędzy układem napędowym a napędzanym, redukując wszelkiego rodzaju obciążenia dynamiczne, np. drgania.

Natomiast wciąż zagadnieniem istotnym pozostaje ocena wpływu rodzaju i składu cieczy na właściwości cieczy reologicznych pod kątem możliwych do uzyskania charakterystyk przeniesienia momentu obrotowego. We wstępie do pracy Doktorant podał cel pracy, jako – cytując: „Celem pracy doktorskiej jest budowa i badania eksperymentalne sprzęgła hydraulicznego z magnetoreologiczną cieczą roboczą i wirującym polem magnetycznym.” Jak również istotną informację, że: „Praca doktorska została częściowo wykonana w ramach międzynarodowego projektu badawczego pod tytułem: Innovative Application of Smart Fluid in Industrial Robot Gripper, realizowanego w Uniwersytecie Technologiczno-Humanistycznym im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu w latach 2016 – 2018, którego uczestnikami były Polska i Tajwan.” Autor określił też zadanie, jakie było do zrealizowania, a mianowicie dokonanie analizy literatury i na jej podstawie poszukiwanie nowych koncepcji rozwiązań sprzęgła hydraulicznego z magnetoreologiczną cieczą roboczą.

Zapoznając się z pracą już na wstępie mogę stwierdzić, że Autor dokonał, w rozdziale 1, na podstawie literatury krajowej i zagranicznej, bardzo szerokiego przedstawienia, zarówno od strony teoretycznej jak i na przykładach rozwiązań praktycznych, stanu wiedzy związanej ze strukturą i właściwościami cieczy magnetoreologicznych oraz przykładami sprzęgła opartych na ich wykorzystaniu.

Wnioski z analizy literatury stały się podstawą do podjęcia własnych prac badawczych nad cieczami magnetoreologicznymi, włącznie z opracowaniem cieczy na bazie oleju silikonowego oraz, w jednym przypadku, standardowego smaru ŁT-43 w połączeniu z cząstkami żelaza o różnej granulacji. Do badań, w tym porównawczych, użyto również cieczy AL. 458 produkcji firmy Fraunhofer. Zaproponowane do badań ciecze poddano badaniom właściwości fizycznych, pod kątem przydatności ich użycia jako cieczy roboczych w trakcie dalszych badań stanowiskowych (co nazwałbym) na modelu fizycznym sprzęgła z różnymi cieczami, i dla różnych wartości parametrów

zewnętrznych, w tym głównie natężenia pola magnetycznego i jego prędkości obrotowej. Poddane analizie wyniki, szeroko prowadzonych badań pozwoliły Autorowi na wstępne określenie przydatności badanych cieczy roboczych pod kątem zastosowania w sprzęgłach. Natomiast w celu dalszego pogłębienia wiedzy z zakresu zachowania się cieczy w różnych warunkach pracy, Autor, w rozdziale 3, dokonał - w oparciu o wiedzę teoretyczną popartą własnymi obserwacjami w badaniach doświadczalnych - opisu przemieszczenia się cząstek stałych w cieczy MR. Na uwagę zasługują tu badania rozkładu gęstości cieczy pod wpływem sił zewnętrznych, a mianowicie: podczas wirowania, czy po przyłożeniu magnesu do ścianki nieruchomego naczynia. W badaniach tych Uzyskał interesujące wyniki o charakterze ilościowym jak i jakościowym, które w dużej mierze uzasadniły postawiony cel pracy, jakim stały się badania eksperymentalne sprzęgła hydraulicznego z cieczą MR, a ściślej biorąc sprzęgła z wirującym polem magnetycznym usytuowanym na obwodzie sprzęgła, jako rozwiązaniem korzystniejszym od tego, gdzie wirujące pole magnetyczne usytuowane by było w płaszczyźnie prostopadłej do osi sprzęgła.

W celu potwierdzenia wyciągniętych wstępnie wniosków Autor zbudował, opisane w rozdziale 4 wraz z metodyką badań, stanowiska badawcze. Przeprowadzone badania dla różnych cieczy roboczych, w tym o różnej masie zawartych w nich cząstek stałych, pozwoliły na sporządzenie szeregu charakterystyk momentu  $M$  w funkcji prędkości obrotowej  $n$  naczynia oraz charakterystyk wartości maksymalnego momentu w funkcji prędkości obrotowej pola magnetycznego. Analiza uzyskanych wyników potwierdziła wstępnie sformułowane obserwacje, że obiecujące wyniki w zastosowaniu cieczy MR można uzyskać dla opisanego modelu pracy sprzęgła przy usytuowaniu wirującego pola magnetycznego tylko na obwodzie sprzęgła. Warto tu przytoczyć istotne stwierdzenia, że: o ile nie stwierdzono ruchu obrotowego wału wyjściowego sprzęgła dla przypadku lokalizacji wirującego pola magnetycznego w płaszczyźnie prostopadłej do osi sprzęgła, to dla sprzęgła z usytuowaniem wirującego pola magnetycznego na obwodzie sprzęgła - ruch całej objętości cieczy najczęściej miał miejsce. Również istotnym spostrzeżeniem jest, że ( jak widać na Rys. 4.5., s.93) w przypadku braku momentu hamowania  $M$  istnieje liniowa zależność prędkości obrotowej naczynia  $n$  od prędkości obrotowej pola magnetycznego. Ponadto, jak pokazuje tabela 4.1, s. 93, wartości poślizgu  $s$  są prawie równe dla prędkości

obrotowej pola magnetycznego w zakresie od 1200 do 3000 obr/min. Na podstawie zestawionych zależności  $M_{\max} = f(n_p)$  (4.15 - 4.19) widać, że moment obrotowy  $M_{\max}$  jest zazwyczaj tym większy, im większa jest prędkość obrotowa. Autor, słusznie tłumaczy, że czynnikiem mającym największy wpływ na zależności  $M_{\max} = f(n_p)$  jest masa żelaza zawartego w cieczy MR, podczas gdy wpływ wielkości i postaci cząstek żelaza na zależność  $M_{\max} = f(n_p)$  jest mniejszy.

Zawarta w rozdziale 5 interpretacja i ocena wyników badań odnosi się do zaobserwowanych zjawisk zachodzących podczas pracy, będącego przedmiotem badań sprzęgła, takich, jak: powstawanie tzw. „zmarszczek” na powierzchni nieruchomej cieczy, podczas pierwszych sekund po włączeniu wirującego pola magnetycznego, aby następnie, kiedy ciecz zacznie się obracać wraz ze zbiornikiem, przybrać formę sześciokąta. Autor w dalszej części rozdziału 5 interpretuje powyższe zaobserwowane zjawiska odnosząc się do opisanych w literaturze wyników badań w tym zakresie.

W podrozdziale 5.3 Autor dokonał pewnych obliczeń, które przy przyjętych założeniach co do modelu geometrii sprzęgła i jego wymiarów pozwolił na oszacowanie wartości współczynnika tarcia  $\lambda$  jaki występuje pomiędzy cieczą MR a ścianką naczynia, uzyskując wartość zbliżoną do wartości współczynnika tarcia ślizgowego półpłynnego, z jakim mamy do czynienia w budowie maszyn.

W podrozdziale 5.4., będący przedmiotem badań rodzaj sprzęgła z wirującym polem magnetycznym usytuowanym na obwodzie sprzęgła Autor porównał go, ze względu na zasadę działania i uzyskiwane charakterystyki, z innymi rozwiązaniami, słusznie stwierdzając, że ma ono niektóre cechy sprzęgieł indukcyjnych (budowa na rys. 5.14. i 5.21.), jak też, co do zasady działania, jest swego rodzaju połączeniem sprzęgła wiskotycznego i hydrokinetycznego, czy też sprzęgieł pracujących na zasadzie wykorzystania prądów wirowych (charakterystyki na rys. 5.20. i 5.22.)

W podrozdziale 5.5 Doktorant podał przykładowe zastosowania sprzęgieł z wirującym polem magnetycznym umiejscowionym na obwodzie sprzęgła, słusznie podkreślając łatwość jego sterowania, trwałość oraz korzystny ze względów konstrukcyjno-eksploatacyjnych brak sztywnego połączenia elementu napędzającego z elementem napędzanym.

### 3. Ocena układu treści i uwagi szczegółowe

Układ treści rozprawy jest poprawny, przedstawione w poszczególnych rozdziałach rysunki i zdjęcia w zdecydowanej większości są poprawnie opisane i czytelne. Praktycznie wszystkie wykazane w spisie pozycje literatury występują w odpowiednich miejscach opracowania. Niemniej jednak Autor nie ustrzegł się drobnych błędów redakcyjnych, z których większość zauważonych zestawiono poniżej (nie zaznaczając błędów interpunkcyjnych) – i tak:

- str. 4, w najważniejszych oznaczeniach nie uwzględniono przyjętego i występującego w wielu miejscach oznaczenia prędkości obrotowej  $n$  (obr/min) jak też nie rozróżniono wielkości oznaczonych tym samym symbolem, np. duże  $T$ , jako czas i jednostka indukcji magnetycznej  $B$ , gdzie literą  $B$  oznaczono również jedna z opracowanych cieczy;
- str. 9, w. 6 tekstu od góry – powinno być **czas** zamiast czasem;
- str.40, w.7 tekstu w podrozdz. 1.5.- powinno być **mniejszą** zamiast mniejsza;
- str.40, w.7 tekstu w podrozdz. 1.5. – ruch całej objętości koloidu ferrokoloidu – wystarczy chyba samo określenie .... **ferrokoloidu?**;
- str. 54, 58, 60, 62 i 64, wiersze 3 tekstu od góry oraz str.124, w. 2 od góry tekstu Załącznika – powinno być **przystawki** zamiast przestawki;
- – powinno być **przystawki** zamiast przestawki;
- str. 66 do 68, na rysunkach lepiej byłoby podać wartości momentu  $M$  w mNm, tak jak na poprzednich wykresach w rozdziale;
- str. 73, w.8 od dołu – powinno być **przystawki** zamiast przestawki;
- str. 77, w. 9 tekstu od dołu – powinno być **ciśnienia** zamiast cieniienia;
- str. 89, w. 20 od dołu – powinno być **cieczy** zamiast cieczech;
- str. 91, w podpisie pod Rys. 4.2. powinno być **sprzęgła** zamiast przekładnia;
- str.92, w. 8 od dołu – powinno być **obrotowemu** a nie oborowemu;
- str. 94, w. 1 i 2 od dołu – powtórzenie wyrazu „gdy”;
- str.99, w. 7 od dołu – powinno być **uporządkowany** zamiast uprzadkowany;
- str. 109, w podpisie pod Rys. 5.16. – powinno być raczej ...z magnesami **stałymi** zamiast ....trwałymi;;
- str.114, w. 2 od dołu – powinno być **napędzającą** zamiast napędzająca;

#### 4. Ocena podsumowująca pracę doktorską

W szczególności na podkreślenie zasługuje fakt, że Autor wykazał się umiejętnością prowadzenia badań doświadczalnych, i rozważań teoretycznych, co jest istotnym elementem w identyfikacji właściwości i tworzenia nowych rozwiązań obiektów technicznych. Reasumując w tym miejscu, biorąc pod uwagę zawarte w niej treści teoretyczne i badawcze, stwierdzam, że praca zawiera treści interesujące zarówno pod względem poznawczym, jak i użytkowym.

Jednak podchodząc krytycznie do pracy, pewne zastrzeżenie budzić może sformułowanie tematu pracy, który nie do końca odpowiada obiektowi, na którym prowadzono badania, gdzie również Autor pod koniec sam stwierdza, że badania wykonane były na etapie swego rodzaju „demonstratora koncepcji”, sugerując, słusznie zresztą, że następnym krokiem byłoby opracowanie założeń do zbudowania prototypu i poddaniu go badaniom, dla którego to prototypu tytuł pracy byłby bardziej uprawniony.

Pewien niedosyt budzić może również brak, wymaganych w pracach eksperymentalnych, głębszych analiz błędów pomiarów, z uwzględnieniem metodyki i użytej aparatury pomiarowej. Dalej, w stosunku do zamieszczonych wykresów, przedstawiających wyniki badań, może nasuwać się pytanie, czy prowadzono również próby w celu potwierdzenia lub wykluczenia zjawiska histerezy, przy zmianie nie tylko wartości ale i kierunku zmian parametrów fizycznych, od których zależały uzyskane wyniki w postaci charakterystyk.

O ile należy się zgodzić z oceną Autora, co do możliwości i korzyści z zastosowania sprzęgieł hydraulicznych z cieczą magnetoreologiczną i wirującym polem magnetycznym, to brakuje tu odniesienia do oszacowania ich sprawności, w porównaniu z innymi sprzęgłami bez mechanicznego połączenia elementu napędzającego i napędzanego, jak i chociażby przybliżonych kosztów budowy tego typu rozwiązań. Jest to temat do dyskusji przed sygnalizowanym w pracy planem kontynuowania, jak zrozumiałem, dalszych badań i prac naukowych w tym zakresie.

Niezależnie od powyżej przedstawionych uwag, należy podkreślić, że praca doktorska Pana mgr inż. Karola Musiałka, stanowi na tym etapie, dość istotny wkład w zakresie badań zjawisk w nowatorskich rozwiązaniach sprzęgieł

z magnetoreologicznymi cieczami roboczymi, a sformułowane, na podstawie analiz teoretycznych i badań doświadczalnych, wnioski mają charakter zarówno poznawczy jak i użyteczny. Ponadto należy stwierdzić, iż Autor wykazał w swej rozprawie, że jest przygotowany do prowadzenia prac badawczych w dyscyplinie inżynierii mechanicznej.

Przechodząc do ogólnej oceny pracy stwierdzam, że praca Pana mgr inż. Karola Musiałka stanowi kompleksowe podejście do problemu, od analiza stanu wiedzy przez prace doświadczalne, jak i pewne obliczenia i modelowanie matematyczne - w części teoretycznej, a pewne uwagi i zauważone błędy edycyjne nie obniżają wartości merytorycznej i pozytywnej oceny pracy.

Odnosząc się do podkreślonych w recenzji wartości, sugeruję aby wybrane treści pracy zostały upowszechnione, po dokonaniu pewnych redakcyjnych skrótów, nie mających wpływu na stronę merytoryczną, jako że zawarte w pracy wyniki i wnioski mogą być przydatne w dalszych pracach w prezentowanej dziedzinie, w której jest widoczny pewien niedostatek opracowań, w szczególności popartych badaniami doświadczalnymi, na modelach fizycznych.

## **5. Wniosek końcowy**

**Reasumując, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Karola Musiałka, pt. „Sprzęgło hydrauliczne z magnetoreologiczną cieczą roboczą i wirującym polem magnetycznym”, wpisuje się w dyscyplinę inżynieria mechaniczna i spełnia w sposób wystarczający wymagania, jakie stawia paragraf 6 ust. 3 i 4, rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z dnia 30 stycznia 2018 r. poz. 261).**

**Na tej podstawie stawiam wniosek o dopuszczenie pracy doktorskiej Pana mgr inż. Karola Musiałka do publicznej obrony.**



Kraków, 15.10.2021

Dr hab. inż. Andrzej Sobczyk, em. prof. PK