

Prof. dr hab. inż. Czesław Kundera  
Politechnika Świętokrzyska  
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Kielce, 29.10.2021 r.

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Spotowskiego  
pt. „Hamulec wiskotyczny z elektoreologiczną cieczą roboczą przeznaczony do  
wywierania stałej siły”

Promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Kęsy  
Promotor pomocniczy: dr inż. Artur Olszak

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała Senatu Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu z dnia 27 maja 2021 r. oraz pismo JM Rektora, prof. dr hab. inż. Sławomira Bukowskiego z dnia 26 sierpnia 2021 r.

### Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa liczy 186 stron i obejmuje 130 rysunków, schematów, wykresów, 25 tabel, wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, 30 stronicowy załącznik zawierający opis programów sterujących oraz spis literatury: książki, artykuły, patenty, katalogi, strony internetowe – razem 110 pozycji.

Układ pracy nieco odbiega od zasad jakie są powszechnie przyjęte przy redagowaniu rozpraw doktorskich. Autor w krótkim wstępie, prawie jednostronicowym, podaje kilka ogólnych uwag o urządzeniach od których wymagana jest realizacja stałego nacisku i na końcu formułuje następujący cel pracy, „... zastosowanie hamulca wiskotycznego z elektoreologiczną cieczą roboczą sterowanego za pomocą zmiany wysokiego napięcia, do wywierania stałej siły nacisku”. Tylko jedno zdanie, bez dodatkowych wyjaśnień, uszczegółowienia, na przykład, w jaki sposób będzie realizowany zapisany cel, co będzie stanowiło potwierdzeniem osiągnięcia tego celu, itp.

W rozdziale 2 przedstawiono przegląd literaturowy, który w pierwszej części zawiera opis publikacji naukowych z zakresu badań i modelowania właściwości fizykochemicznych cieczy elektoreologicznych (ER) oraz urządzeń wykorzystujących te ciecze, takich jak zawory, tłumiki, sprzęgła i hamulce. Interesujący z punktu widzenia celu rozprawy jest opis

i poszerzona analiza publikacji z zakresu sposobów sterowania sprzęgieł i hamulców z cieczami ER oraz ich praktycznym wykorzystaniem w urządzeniach prototypowych.

Z przeprowadzonego przeglądu aktualnej literatury wynika, że problem sterowanych sprzęgieł i hamulców z cieczami ER jest znany i od wielu lat badany w kilku międzynarodowych ośrodkach naukowych. Należy zaznaczyć, że do tych zespołów badawczych zalicza się również zespół z Uniwersytetu Technologiczno – Humanistycznego w Radomiu kierowany przez profesora Zbigniewa Kęsego.

W rozdziale 3 została opisana koncepcja zastosowania hamulca wiskotycznego z cieczą ER do wywierania stałej siły nacisku szczęk chwytaka z napędem elektrycznym.

Opisano sposób i pokazano schemat uzyskania stałej siły nacisku za pośrednictwem sprzęgła wiskotycznego poprzez unieruchomienie wału wyjściowego przez ramię naciskające na jedną ze szczęk chwytaka. Przedstawiony sposób pomiaru i sterowania siłą nacisku przez hamulec z cieczą ER został zrealizowany fizycznie w badaniach eksperymentalnych opisanych w dalszej części rozprawy.

W rozdziale 4 przedstawiono konstrukcję badanego hamulca wiskotycznego z cieczą ER oraz stanowisko badawcze. Użyty w badaniach hamulec z cieczą ER powstał w wyniku modyfikacji konstrukcji sprzęgła zespolonego z cieczą ER, badanego we wcześniejszej pracy doktorskiej Ireneusza Musiałka (2008). Modyfikacja sprzęgła zespolonego z cieczą ER, w celu przekształcenia go w hamulec wiskotyczny z cieczą ER, polegała na wyłączeniu z użycia (zablokowania) sprzęgła hydrokinetycznego i unieruchomieniu wału wyjściowego. Dalej w rozdziale jest opisane dokładnie stanowisko badawcze, jego wyposażenie mechaniczne, elektryczne i elektroniczne. Zmiany dokonane przez Autora w budowie tego stanowiska, polegały głównie na zainstalowaniu centralnej jednostki sterującej w postaci programowalnego sterownika PLC, skomunikowaniu go z istniejącymi w szafie podzespołami elektrycznymi z uwzględnieniem możliwości przyszłej rozbudowy o kolejne elementy.

Rozdział 5 zawiera badania wstępne charakterystyk hamulca z cieczą ER bez i z obecnością pola elektrycznego. W pierwszym przypadku badań stanowiskowych były wykonywane pomiary siły nacisku i temperatury cieczy roboczej przy skokowej zmianie prędkości obrotowej wału wyjściowego hamulca wiskotycznego z cieczą ER. W drugim przypadku badano wpływ napięcia elektrycznego na wartość siły nacisku wywieranej przez hamulec z cieczą ER, dla zadanej prędkości obrotowej wału wyjściowego.

Kolejny rozdział 6 stanowi główną część rozprawy. Zawiera opis i realizację sterowania momentem hamowania lub siłą nacisku wywieraną przez hamulec wiskotyczny z cieczą ER. Został przedstawiony obiekt regulacji i jego uproszczony model teoretyczny. Przedstawiono identyfikację parametrów tego modelu na podstawie sporządzonych charakterystyk skokowych. Przyjęto schemat sterowania, typ regulatora oraz opisano dobór jego nastaw. Następnie pokazane zostały testy sprawdzające poprawność działania opracowanego sposobu sterowania siłą nacisku.



Praca kończy się wnioskami ogólnymi (rozdział 7) oraz propozycjami prowadzenia dalszych prac rozwojowych nad konstrukcją sterowanego hamulca wiskotycznego z cieczą ER, opracowania dokładniejszych metod ich projektowania ze szczególnym uwzględnieniem zależności naprężeń stycznych cieczy ER od temperatury oraz nowych metod sterowania. Zaproponowany w pracy algorytm sterowania może być punktem wyjścia do opracowania bardziej skutecznych metod sterowania hamulca wiskotycznego z cieczą ER.

### **Ocena merytoryczna**

Przedłożona rozprawa ma charakter eksperymentalny. Doktorant postawił sobie cel opracowania sposobu sterowania momentem hamowania lub inaczej siłą nacisku wywieraną przez hamulec wiskotyczny z cieczą ER. Aby zrealizować postawiony cel, Autor wykonał następujące działania:

- zmodernizował konstrukcję istniejącego zespolonego sprzęgła z cieczą ER;
- rozbudował istniejące stanowisko badawcze;
- przeprowadził badania wstępne;
- zidentyfikował układ regulacji;
- zaproponował metodę (algorytm) sterowania;
- dobrał typ i nastawy regulatora;
- przeprowadził testy weryfikujące opracowany algorytm sterowania.

Przedstawione działania tworzą zamknięty, logiczny ciąg prac, które w całości stanowią, moim zdaniem głównie osiągnięcie rozprawy.

Zasadniczą częścią rozprawy jest rozdział 6, w którym Autor przedstawił kolejne etapy opracowania własnej metody sterowania siłą nacisku wywieraną przez ramię hamulca wiskotycznego z cieczą ER.

Został poprawnie zdefiniowany obiekt regulacji z jednym czynnikiem (sygnałem) wyjściowym – siłą nacisku oraz dwoma czynnikami (sygnałami) wejściowymi, tj. prędkością obrotową wału wejściowego i napięciem elektrycznym doprowadzanym do elektrod hamulca. Założono, że badany obiekt regulacji można przybliżyć modelem (członem) inercyjnym pierwszego rzędu. Następnie dla dwóch, wyżej wymienionych czynników wejściowych sporządzono charakterystyki skokowe i przeprowadzono klasyczną identyfikację parametrów przyjętych modeli. Wyznaczono odpowiednio stałe czasowe oraz współczynniki wzmocnienia.

Na podstawie analizy literatury oraz odpowiedzi skokowych badanego hamulca wiskotycznego z cieczą ER Autor przyjął, że regulacja siły nacisku będzie realizowana w układzie zamkniętym za pośrednictwem zmian wysokiego napięcia elektrycznego podawanego na elektrody hamulca dla ustalonych wartości prędkości obrotowej silnika napędowego. Wybór wartości prędkości obrotowej będzie uzależniony od zadanej wartości

siły nacisku, na podstawie tzw. „tabeli prędkości”. Tabela ta została sporządzona w badaniach wstępnych z pomiarów siły nacisku dla wybranych prędkości obrotowych wału wejściowego hamulca bez podłączenia pola elektrycznego.

Do sterowania przyjęto, podobnie jak w cytowanych pracach naukowych, regulator proporcjonalno – całkujący (PI). Dobór nastaw regulatora PI przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch znanych inżynierskich metod Zieglera-Nicholsa.

Ze względu na występowanie istotnych różnic w nastawach regulatora, otrzymanych dwoma różnymi metodami przeprowadzono testy sprawdzające układu sterowania. Ostatecznie dokonano ręcznej korekty nastaw regulatora, tak aby w zadanym zakresie zmian prędkości obrotowej, tj. od 50 do 600 obr/min oraz zmian napięcia elektrycznego od 0 do 2,5 kV, sterowany hamulec wiskotyczny z cieczą ER, utrzymywał zadaną siłę nacisku na stałym poziomie z akceptowalnym uchybem mniejszym od 1 N.

Testy pokazały, że zaproponowany algorytm sterowania działa poprawnie w przyjętym zakresie zmian prędkości obrotowej zarówno przy sterowaniu stałowartościowym jak i nadążnym, gdy zadana wartość siły nacisku rosła i malała liniowo w zakresie od 10 do 60 N. W wyniku przeprowadzonych testów, wprowadzono dodatkową niewielką korektę algorytmu sterowania, uwzględniając wartość temperatury cieczy roboczej. Korekta dotyczyła zmian wartości prędkości obrotowej, gdy temperatura cieczy roboczej przekroczy 45 °C.

Sam Autor o wprowadzonej korekcie temperaturowej, we wnioskach końcowych nie wypowiada się jednoznacznie pozytywnie.

Opisany wyżej sposób sterowania hamulcem z cieczą ER nie jest całkowicie oryginalny, co potwierdzają cytowane prace naukowe. Pewną nowością zaproponowanej metody sterowania jest dobór wartości wejściowej prędkości obrotowej hamulca na podstawie zadanej tabeli prędkości, sporządzonej w badaniach wstępnych.

Realizacja pracy wymagała od Doktoranta pogłębionej wiedzy z zakresu inżynierii mechanicznej, mechaniki płynów, teorii sterowania oraz informatyki przemysłowej. Ponadto należy podkreślić umiejętności Doktoranta w implementacji opracowanej metody sterowania na stanowisku badawczym. Świadczą o tym, wydruki opracowanych programów sterujących załączonych do rozprawy.

### **Uwagi krytyczne i-kwestie dyskusyjne**

W realizacji wymienionych wyżej prac projektowo - badawczych można dopatrzeć się pewnych nieprawidłowości, dyskusyjnych wyborów, niezamierzonych błędów, które obniżają ogólny poziom naukowy rozprawy.

- 1) W badaniach doświadczalnych są wykorzystywane różne czujniki pomiarowe, urządzenia nastawcze. Wiadomo, że każdy element posiada swoją dokładności i wnosi określony błąd do układów pomiarowych, nastawczych. Brakuje w pracy oszacowania



błędów, na przykład torów pomiarowych, co sprawia, że otrzymane wyniki są mało wiarygodne.

Jako przykład rozrzutu wartości mierzonej siły nacisku hamulca, mogą być przebiegi pokazane w rozdziale 5. Wartość siły nacisku dla ustalonej prędkości wału napędzającego  $n=900$  obr/min, na rysunku 5.5 nie osiąga wartości 30 N, natomiast na rysunku 5.9 wartość tej siły wynosi około 35 N, stąd można oszacować błąd względny pomiaru, który wynosi około 18%.

Ponadto w pracy są zamieszczone pojedyncze charakterystyki bez powtórzeń, a tym samym nie ma statystycznej obróbki (analizy) wyników. Na stronie 107 pod tabelą 5.3, Autor błędnie określa względny przyrost wartości siły nacisku jako wartość średniej arytmetycznej.

- 2) Nieprecyzyjne są wartości prędkości podane w tzw. tabeli prędkości (Tab. 6.3/129). Na przykład przyjęta wartość siły nacisku 65 N dla prędkości obrotowej 600 obr/min jest nieosiągalna przy zasilaniu hamulca napięciem elektrycznym wynoszącym 2,5 kV. Pokazują to przebiegi na rysunku 6.7/128 oraz na rysunku 5.9/106.
- 3) Rozbieżności w wartościach siły nacisku można również zauważyć porównując charakterystyki skokowe na rysunku 6.3/125 z przebiegami pokazanymi na rysunku 6.7/128. Z charakterystyk skokowych dla prędkości obrotowej 100 i 200 obr/min i zadanym napięciu elektrycznym 2,5 kV, ustalona wartość siły nacisku mieści się w przedziale  $35 \div 45$  N. Natomiast na przebiegach pokazanych na rysunku 6.7, dla prędkości obrotowej 100 i 200 obr/min, podobny zakres wartości siły nacisku jest osiągalny przy zadanym napięciu elektrycznym od 1,7 do 2 kV. Dla napięcia elektrycznego 2,5 kV, osiągalne wartości siły nacisku są niższe, tj.  $25 \div 30$  N.
- 4) W punkcie 6.2 na stronie 129, Autor zamieszcza następujące zdanie, „...*Występowanie histerezy prędkości powoduje, że zmiana prędkości obrotowych jest rzadsza, co ogranicza zmiany siły nacisku, występujące przy każdorazowej zmianie prędkości obrotowej*”. Pomijając styl tego zdania, Autor chyba nie rozumie pojęcia histerezy. Histereza raczej dotyczy różniących się wartości siły nacisku przy zmianach napięcia elektrycznego od 0 do 2,5 kV i z powrotem do 0 kV, przy ustalonej prędkości obrotowej. W pracy nie znajdziemy wykresu histerezy wartości siły nacisku, natomiast można ją zauważyć na przebiegach pokazanych na rysunku 5.9/106.
- 5) Dobór nastaw regulatora PI przeprowadzono wstępnie wykorzystując dwie znane inżynierskie metody Zieglera - Nicholasa, a następnie skorygowano je na podstawie przeprowadzonych testów. Ostatecznie dobrano stałe wartości nastaw regulatora PI dla całego zakresu zmian prędkości obrotowej. Rodzi się pytanie, czy nie można było dobrać wartości nastaw regulatora dla ustalonych kilku prędkości obrotowej z badanego zakresu i sporządzić tabelę tych nastaw podobną do tabeli prędkości?
- 6) Autor we wniosku 5 (punkt 6.6) pisze o negatywnym wpływie temperatury cieczy roboczej na wartość siły nacisku. Natomiast na stronie 107, możemy przeczytać, że „ ...

*głównym czynnikiem wpływającym na przyrost siły nacisku jest temperatura powodująca zmianę naprężeń stycznych w cieczy roboczej*". Powstaje pytanie, który wniosek jest prawdziwy?

- 7) W tabeli 6.1/125 zostały podane błędne wartości siły nacisku, nazwane „*pierwszymi lokalnymi maksimami*”.

Od strony edycyjnej, poza nielicznymi usterkami językowymi i stylistycznymi, praca jest wykonana dość starannie. Dotyczy to zarówno formatowania tekstu, rysunków, tabel oraz zależności matematycznych.

### **Wniosek końcowy**

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne obniżają ogólną ocenę merytoryczną, tym niemniej w podsumowaniu stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska stanowi pewien istotny wkład w badania i rozwój konstrukcji mechatronicznych urządzeń wykorzystujących sterowane cieczy reologiczne, a w szczególności sprzęgieł i hamulców z cieciami elektroreologicznymi.

Na podstawie przedstawionej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Spotowskiego pt. „*Hamulec wiskotyczny z elektroreologiczną cieczą roboczą przeznaczony do wywierania stałej siły*”, **spełnia wymagania** stawiane przez Ustawę o *stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2017 r., poz.1789) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

