

Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Katedra Automatyki i Informatyki E-1

dr hab. inż. Janusz Góldasz, prof. PK

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Spotowskiego
pt.

“Hamulec wiskotyczny z elektoreologiczną cieczą roboczą
przeznaczony do wywierania stałej siły”

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

Podstawa prawna oceny:

Uchwała nr 000-9/9/2021 Senatu Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, z dnia 27 maja 2021 r.

1. CEL I ZAKRES ROZPRAWY

W Rozdziale 1 Doktorant sformułował cel pracy: zastosowanie hamulca wiskotycznego z cieczą elektoreologiczną sterowanego za pomocą zmiany wysokiego napięcia do wywierania stałej siły nacisku. Koncepcja wykorzystania hamulca elektoreologicznego (ER) do wywierania stałej siły jest przedstawiona w Rozdziale 3.2

Ogólnie, Doktorant podjął się opracowania układu z hamulcem z cieczą ER do sterowania siłą nacisku. Autor wskazuje w pracy potencjalne obszary zastosowań badanego układu – robotyka: chwytaki i napędy ramion robotów.

W tym celu Autor postanowił dokonać obszernych badania układu z hamulcem wiskotycznym z cieczą ER do sterowania siłą nacisku. Zmodyfikował wybraną przez siebie konstrukcję sprzęgła ER, zaproponował koncepcję układu regulacji i przeprowadził szerokie badania stanowiskowe zaprojektowanego przez siebie układu.

Podjęte przez Doktoranta zadanie badawcze ma aspekt nowości. Cieszy fakt podjęcia przez Doktoranta tematu w zakresie cieczy ER i ich zastosowań.

2. ANALIZA ZAWARTOŚCI ROZPRAWY I SPOSÓB JEJ MERYTORYCZNEGO PRZEDSTAWIENIA

Wyniki badań Doktoranta zostały udokumentowane na 186 stronach rozprawy zawierającej:

streszczenia w j. polskim i angielskim, spis symboli i ważniejszych oznaczeń, 7 rozdziałów, spis literatury zawierający 110 pozycji oraz 1 załącznik (program w języku drabinkowym dla sterownika PLC). W spisie literatury znalazła się 1 recenzowana praca (współautorska) Autora.

Rozdział 1 (wprowadzenie) zawiera krótkie omówienie istoty problemu badawczego oraz przedstawienie motywacji, które skłoniły Autora do jego podjęcia i rozwiązania.

Rozdział 2 (Przegląd literatury) Autor rozpoczyna od omówienia zasady działania urządzeń z cieciami ER działających w określonych trybach pracy (tłumiki, hamulce, sprzęgła, belki.). Analizuje skład typowych cieczy ER oraz przedstawia podstawowe modele reologiczne służące do opisu matematycznego zachowania tychże cieczy. W Rozdziale 2.3 omawia sposoby sterowania hamulców i sprzęgieł z cieciami ER w układach bez sprzężenia zwrotnego i ze sprzężeniem zwrotnym. Analizowane są układy regulacji momentu poprzez zmianę lepkości dynamicznej, regulacji stałej prędkości oraz stałego momentu hamulców ER oraz kontroli prędkości obrotowej w silnikach elektrycznych przy użyciu urządzeń z cieciami ER. Na przykładzie układu sterowania prędkości wału silnika elektrycznego Autor omawia stosowane w tym obszarze regulatory: PID oraz ślizgowe (*sliding mode*). Analizę obecnego stanu badań Autor kończy krytycznym podsumowaniem.

Następnie, w **Rozdziale 3** Autor opisuje koncepcję zastosowania hamulca wiskotycznego z cieczą ER do wywierania stałej siły. Analizuje obszary potencjalnych zastosowań oraz przedstawia zasadę działania proponowanego przez siebie układu (Rys. 3.9 oraz 3.10).

Materiał zawarty w **Rozdziale 4** poświęcony jest następnie omówieniu stanowiska badawczego z hamulcem ER. Autor przedstawia wykonane przez siebie modyfikacje konstrukcji sprzęgła zespolonego z cieczą ER celem przekształcenia go w hamulec wiskotyczny, omawia schemat połączeń elektrycznych oraz sposób pomiaru temperatury sprzęgła przy użyciu rezystancyjnego czujnika temperatury. W Rozdziale 4.2 zawarty jest szczegółowy opis stanowiska badawczego do badań hamulca z cieczą ER, a w Rozdziale 4.3 Autor charakteryzuje użyte w badaniach ciecze ER. Przedstawia skład i charakterystyki reologiczne wybranej przez siebie cieczy oraz uzasadnia wybór danej cieczy do badań.

Rozwinięciem materiału z Rozdziału 4 jest **Rozdział 5**, w którym Autor przedstawia wyniki badań charakterystyk hamulca wiskotycznego ER. Omawia przygotowania do badań laboratoryjnych i prezentuje wyniki badań hamulca w różnych stanach pracy. Otrzymane wyniki prezentowane są w postaci przebiegów czasowych prędkości obrotowej, uchybu prędkości, temperatury, momentu obrotowego oraz zmian siły nacisku, napięcia oraz mocy. W Rozdziale 5.2.1 Autor szczegółowo analizuje wpływ temperatury na wartość siły nacisku, a w Rozdziale 5.2.2 omawia wpływ przebiegów elektrycznych na wyniki badań. Rozdział 5 kończy się sformułowaniem przez Autora szeregiem wniosków odnośnie przebiegu badań oraz czynników mających kluczowy wpływ na otrzymane przezeń rezultaty.

Sposób regulacji siłą nacisku przedstawiony jest przez Autora w **Rozdziale 6** (Rys. 6.2). Autor prezentuje tu koncepcję układu sterowania poprzez regulację prędkości obrotowej i napięcia elektrycznego. Podejmuje także próbę doświadczalnego wyznaczenia stałych czasowych układu w oparciu o jego odpowiedzi skokowe. Przyjmuje koncepcję sterowania siłą nacisku w układzie zamkniętym przy użyciu klasycznego regulatora PI (Rys. 6.6). Koncepcja sterowania siłą nacisku została przezeń zaimplementowana w postaci programu drabinkowego i strukturalnego z użyciem regulatora PLC firmy Siemens. Do strojenia nastaw regulatora PI użyto metod Zieglera-Nicholsa z

manualną korekcją. Działanie układu regulacji siły nacisku przedstawiono w Rozdziale 6.4. Podobnie jak w poprzednich Rozdziałach, Autor zilustrował przebieg badań przy pomocy przebiegów czasowych siły nacisku, prędkości obrotowej, napięcia, temperatury. Negatywny wpływ temperatury został ograniczony przez Autora poprzez modyfikację układu sterowania polegającą na zmianie prędkości przy maksymalnym napięciu elektrycznym.

W **Rozdziale 7** zawarte jest podsumowanie przeprowadzonych prac, wnioski ogólne oraz sugestie odnośnie kierunku dalszych badań.

3. OCENA MERYTORYCZNA

Uważam, iż w obliczu przedstawionych w rozprawie wyników badań ujętych zwłaszcza w Rozdziałach 5 i 6 można uznać, iż Doktorant osiągnął zamierzone przez siebie cele.

Analiza treści rozprawy wskazuje, iż Doktorant opracował aktualny i obszerny przegląd obecnego stanu wiedzy (Rozdział 2) głównie w zakresie urządzeń z cieczami ER działającymi w trybie ścinania. Spora część przywołanych przez niego opracowań jest szczegółowo analizowana. Niewiele uwagi Autor jednak poświęca modelowaniu matematycznemu w odniesieniu do technologii ER.

Autor zaproponował koncepcję układu z hamulcem wiskotycznym z cieczą ER do wywierania stałej siły, zbudował stanowisko badawcze do badania hamulca jak i opracowanego przez siebie układu regulacji. Przeprowadził obszerne badania laboratoryjne samego hamulca jak i układu do wywierania stałej siły nacisku. Opracował koncepcję sterowania siłą nacisku i poprawnie dobrał nastawy regulatora PI wg metod Zieglera-Nicholsa. Zaproponował też w trakcie badań korektę algorytmu. Dokonał krytycznej analizy wyników i sformułował na ich podstawie określone wnioski szczegółowe i ogólne.

Autor szczegółowo opisuje wykonane przez siebie modyfikacje sprzęgła oraz przygotowania układu do badań. Zwykle obszernie relacjonuje także przebieg samych badań, co pozwala zrozumieć istotę działania badanego układu, jego zachowanie w trakcie badań i ich powtórzenie w przyszłości przez osoby trzecie.

Autor poświęca dużo uwagi przebiciom elektrycznym. Z treści pracy nie wynika jednak, czy badał ciecz ER i hamulec pod kątem obecności zanieczyszczeń metalicznych. Szczegółowo analizuje wpływ temperatury na działanie układu, ale nie monitoruje prądu upływu, który to sygnał mógłby być wykorzystany w zaproponowanym układzie regulacji.

Podsumowując, moim zdaniem, treść rozprawy ma istotny walor poznawczy, zwłaszcza iż dotyczy tak interesującej w dalszym ciągu dziedziny, jaką są ciecze ER i ich zastosowania. Choć Autor nie podjął się próby opracowania modelu matematycznego badanego przez siebie układu, to przeprowadzone przezeń badania dostarczyły istotnych informacji na temat działania tego typu urządzeń i mogą być punktem wyjścia do opracowania bardziej zaawansowanych i skutecznych układów z cieczami ER lub MR (magnetoreologicznymi).

Ogólnie, wybór zakresu i typu badań laboratoryjnych, opis badań, interpretacja otrzymanych wyników, logiczna struktura pracy nie budzą zastrzeżeń jako całość. Uwagi merytoryczne zawarte są w Rozdziale 4.2 niniejszej recenzji.

4. UWAGI

Moje uwagi podzieliłem na dwie zasadnicze grupy: uwagi redakcyjne oraz uwagi merytoryczne.

4.1. Uwagi redakcyjne

Rozprawa została zredagowana przez Doktoranta poprawnie.

Ogólnie rzecz biorąc, wykresy i ilustracje, choć sformatowane w niekonwencjonalny sposób, są wykonane czytelnie. Fotografie są zrozumiałe i czytelne. Moim zdaniem, umieszczenie listingu programu dla sterownika PLC w kodzie drabinkowym w formie załącznika do rozprawy nie było konieczne. W zupełności wystarczyłby schemat blokowy programu umieszczony w Rozdziale 6. Lepszym rozwiązaniem byłoby umieszczenie np. w formie dodatku dokumentacji technicznej badanego hamulca ER.

Usterki gramatyczne i interpunkcyjne są nieliczne.

Cenne jest umieszczenie przez Doktoranta podsumowania w formie wniosków np. w Rozdziałach 2, 5 i 6 oraz spisu oznaczeń.

4.2. Uwagi merytoryczne

Podczas lektury rozprawy nasunęły mi się wymienione niżej uwagi o charakterze merytorycznym (bez podziału na uwagi szczegółowe i ogólne):

- Definicja W. Winslowa mówi o zmianie lepkości pozornej cieczy pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego. Doktorant używa terminu 'naprężenia styczne' (str. 9). W literaturze angielskojęzycznej stosowane jest określenie 'shear stress' (naprężenia ścinające).
- To prawda, iż modele Bingham'a są często używane do opisu reologii cieczy ER, ale Doktorant nie przywołuje żadnych pozycji literaturowych na poparcie tego stwierdzenia (str. 13).
- Na liście trybów pracy cieczy ER brak trybu (przepływu) ściskania (str. 17).
- Na Rys. 2.21 oba warianty b) i c) przedstawiają tłumiki ER działające w trybie mieszanym (hybrydowym) (str. 28).
- M. in. na str. 33 i 36 przeglądu literatury Autor przywołuje nazwy katalogowe cieczy ER. Zamiast tego lepiej byłoby odnieść się do podstawowych własności reologicznych w/w cieczy.
- Tabela 4.2 jest zbędna – Autor na tej samej stronie podaje odsyłacz do dokumentacji zasilacza.
- Na oznaczenie czasu opóźnienia Autor używa tego samego symbolu jak dla naprężeń stycznych (np. str. 131).
- Jednym z czynników wpływających na osiągi cieczy ER jest temperatura. Doktorant nie wspomina jednak, iż równie ważny jest wzrost prądu upływu pomiędzy elektrodami przy wzroście temperatury, co wpływa na pobór mocy np. przez zasilacz wysokiego napięcia.

Prąd upływu nie był monitorowany podczas testów.

- W pracy nie zamieszczono zależności lepkości od temperatury dla wybranej cieczy (ERF6). Brak też informacji nt. zmienności naprężeń granicznych od temperatury dla w/w cieczy. Czy takie pomiary były wykonane?
- Czy Doktorant badał układ (hamulec ER i ciecz) pod kątem drobnych zanieczyszczeń metalicznych (główna przyczyna przebiegów elektrycznych)? W części rozprawy poświęconej badaniom (Rozdziały 5 i 6) brak takich informacji.
- Autor przedstawia wyniki prac głównie w postaci przebiegów czasowych. Cenne byłoby umieszczenie w pracy np. charakterystyk statycznych tłumika.
- Uważam, iż choćby dla celów informacyjnych, w Rozdziale 4 powinny znaleźć się oprócz wymiarów hamulca także inne dane techniczne, jak np. moment bezwładności, waga elementów ruchomych, itp. Pozwoliłoby to, w połączeniu z innymi danymi, na stworzenie modelu matematycznego układu.
- Mając tak dużą ilość zgromadzonych danych i wiedzę nt. badanego obiektu, dlaczego Doktorant nie podjął się stworzenia modelu matematycznego badanego układu?

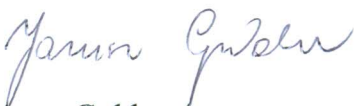
5. KONKLUZJA

Biorąc pod uwagę omówione powyżej rezultaty rozprawy doktorskiej **mgr inż. Tomasza Sopotowskiego** można stwierdzić, iż wyniki jego badań dotyczące układu do wywierania stałej siły nacisku z wykorzystaniem hamulca ER mają aspekt nowości i są istotne z punktu widzenia dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn.

Wymienione przez mnie usterki i uwagi krytyczne w Rozdziale 4 niniejszej recenzji nie podważają faktu osiągnięcia przez Doktoranta założonego przez siebie celu. Doktorant uzasadnił podjęcie sformułowanego przez siebie zadania badawczego i wykazał się wiedzą z zakresu technologii ER. Przeprowadził obszerną analizę obecnego stanu wiedzy. Zaproponował autorską koncepcję układu z użyciem hamulca ER i przeprowadził związane z nim badania doświadczalne, a także przeprowadził poprawną analizę otrzymanych wyników.

Dorobek naukowy Doktoranta, na który powołuje się w rozprawie, zawiera 1 recenzowany artykuł współautorski.

Podsumowując, moim zdaniem, recenzowana przeze mnie rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zawarte w dokumentach ustawowych o stopniach i tytułach naukowych i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Tomasza Sopotowskiego do publicznej obrony.


/Janusz Gołdasz/

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
im. Tadeusza Kościuszki
TYDZIEŃ INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ I KOMPUTEROWEJ
31-155 Kraków, ul. Warszawska 24
tel. 12-628-20-43, 12-628-26-01, 12-628-26-06
12-618-26-07, 12-628-26-08