Prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski
Wydział Maszyn Roboczych i Transportu
Katedra Techniki Cieplnej

Poznań, 20.10.2016 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Adama Rosiakowskiego pt.: „Badania zastosowania przekładni z cieczą magnetoreologiczną do sterowania prędkością obrotową zespołu napędowego"

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Łukasza Brodzika stanowi pismo DR-63/473/02/2016 Dziekana Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej z dnia 5.08.2016r.

Praca zawarta jest na 111 stronach i jest podzielona na 7 rozdziałów poprzedzonych: spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń, a w zakończeniu bibliografią liczącą 113 pozycji literaturowych związanych z tematem pracy.

1. Uwagi wstępne

Praca wielu urządzeń technicznych oparta jest na ruchu obrotowym co wiąże się z potrzebą zmiany prędkości kątowej i przekazywanego momentu obrotowego. Zmiany tych dwóch parametrów można osiągnąć na kilka sposobów jak na przykład przez przekładnie zębate, pasowe czy klinowe. W zależności od rodzaju przekładni jej pracy mogą towarzyszyć drgania, zużycie jej elementów, straty przekazywanej mocy. Dynamiczna praca przekładni wymaga czasu na dokonanie zmiany prędkości kątowej. Dla przykładu w samochodach zmniejszenia prędkości kątowej wału używa się hamulców co wiąże się ze stratą energii i zużyciem hamulców. Badania w kierunku regulacji prędkości kątowej z minimalizacją strat energii i krótkim czasem zmiany prędkości stanowią ważne pole badań naukowych. Osiągnięcie tych własności wymaga zastosowania nowych materiałów takich jak ciecze posiadające zmienną lepkość w wyniku działania pola elektrycznego lub magnetycznego. Z analizy przedstawionej przez Doktoranta wynika, że dobrą cieczą jest ciecz magnetoreologiczna, która w wyniku działania pola magnetycznego istotnie zwiększa lepkość płynu po przyłożeniu niewielkiego napięcia potrzebną do wytworzenia pola magnetycznego.

Zatem zajęcie się zastosowaniem cieczy magnetoreologicznej w sprzęgle powodującym zmianę prędkości kątowej jest tematem ważnym nie tylko z poznawczego punktu widzenia lecz również ma potencjalnie szerokie pole zastosowań w praktyce. Przegląd literatury przedmiotu dokonany przez Doktoranta potwierdza potrzebę przeprowadzenia badań nad zastosowaniem przekładni z cieczą magnetoreologiczną do sterowania prędkością obrotową zespołu napędowego.

2. Omówienie pracy

Pierwsze badania nad cieczami magnetoreologicznymi rozpoczęto na przełomie lat 40 i 50 w USA, jednakże bez znaczących sukcesów ze względu na brak płynnej regulacji parametrów reologicznych cieczy. Burzliwy rozwój nastąpił w ostatnich latach ubiegłego wieku w poszukiwaniu grup substancji

wrażliwych na sygnały zewnętrzne. W grupie tych substancji znajdują się ciecze sterowalne: eletro-reologiczne, ferromagnetyczne i magnetoreologiczne. Z punktu widzenia zastosowań najlepsze właściwości posiadają ciecze magnetoreologiczne, gdyż charakteryzują się dużymi naprężeniami stycznymi (do 100 kPa) i wymagają niskonapięciowych zasilaczy prądu stałego.

Ważnym rozdziałem pracy jest omówienie cieczy magnetoreologicznych. Ciecz ta jest koloidalną zawiesiną cząstek ferromagnetycznych (wykonanych z żelaza, kobaltu, niklu ich stopów oraz tlenków) o wymiarach 0,1–10 mikrometrów. W większości przypadków jest to jednak żelazo karbonylowe charakteryzujące się dużymi wartościami indukcji nasycenia rzędu 2,1 T. Cieczą nośną są najczęściej węglowodory syntetyczne lub mineralne. Ciecz nośna nie przewodzi prądu elektrycznego i jest niemagnetyczna. Powlekanie cząstek ferromagnetycznych substancją czynną zapobiega tworzeniu się aglomeratów i procesowi sedymentacji. Lepkość cieczy ferromagnetycznym poza polem magnetycznym zbliżona jest do lepkości cieczy nośnej. Przyłożenie pola magnetycznego powoduje uporządkowanie pojedynczych domen w łańcuchy co powoduje powstanie lepkości pozornej (stosunek naprężeń stycznych do szybkości ścinania). Wartość lepkości pozornej reguluje się zmianą natężenia pola magnetycznego. Bardzo ważną właściwością cieczy reologicznych jest zachowanie jej parametrów w funkcji cykli (rzędu 10 milionów). Ciecze magnetoreologiczne pracują w zakresie temperatur od –40 do 150 stopni Celsjusza z zachowaniem naprężeń stycznych do 100 kPa. Wpływ lepkości cieczy (bez obecności pola magnetycznego) choć istotnie zmieniający się w funkcji temperatury jest pomijalny w przypadku przyłożenia pola magnetycznego.

Autor w swej pracy do badania zachowania się cieczy reologicznej stosuje powszechnie przyjęty model Binghama. Lepkość pozorna cieczy magnetoreologicznej zależy istotnie od szybkości ścinania i wartości indukcji magnetycznej co pozwala na realizację 4 trybów jej pracy, są to: tryb sprzęgłowy, zaworowy, ściskający oraz zaworowy odwrotny. W sposób obrazowy tryby te Autor zilustrował na rys. 2.7. Istotną własnością cieczy magnetoreologicznej jest wzrost naprężeń stycznych w przeciągu paru milisekund co jest szczególnie pożądane w procesie sterowania. Proces oddziaływania polem magnetycznym na ciecz magnetoreologiczną jest powtarzalny i odwracalny. Ze względu na zastosowania najczęściej występuje tryb ścinający i zaworowy. W trybie ścinającym pracują sprzęgła, hamulce obrotowe i wahadłowe jak również obrotowe tłumiki drgań i pochłaniaczy energii.

Szerokie omówienie zastosowania cieczy magnetoreologicznej stanowiące treść rozdziału 2.2.3 określa potencjał ich stosowania w tych obszarach w których występują procesy hamowania, drgań czy przenoszenia momentu. Jednym z bardziej interesujących zastosowań jest zastosowanie cieczy magnetoreologicznych w urządzeniach obracających się do których zaliczamy sprzęgła, hamulce i przekładnie. Ostatnie lata przynoszą szerokie zainteresowanie tymi urządzeniami. Interesujące są omówienia zasady działania tarczowego (jedno- i wielotarczowe) i walcowego sprzęgła z cieczą magnetoreologiczną, rys. 2.9 i 2.10. Jak już wspomniano szybkość sterowania sprzęgła z cieczą magnetoreologiczną wynosi kilka milisekund zaś dla porównania dla sprzęgła hydraulicznego wynosi ona 200–300 milisekund. Spośród wielu przykładów zastosowania sprzęgieł z cieczą magnetoreologiczną uwagę zwraca hamulec zastosowany do redukcji drgań skrętnych oraz hamowania wału; hamulec taki został skonstruowany w Politechnice Poznańskiej o wielkości momentu oporowego do 28 Nm. Jednym z ciekawszych przypadków jest wykorzystanie sprzęgła magnetoreologicznego w stawie kolanowym protezy kończyny dolnej.

Dokonując szerokiego przeglądu literatury Autor nie natknął się na publikacje dotyczące badania sprzęgła z cieczą magnetoreologiczną w układzie napęd – obciążenie z uwzględnieniem regulacji prędkości obrotowej i przenoszonego zmiennego momentu. Zatem takie sprzęgło pełni również rolę przekładni. **Takie oryginalne ujęcie badania sprzęgła z cieczą magnetoreologiczną w pełni odpowiada wymogom oryginalności i jest podstawą do wykonania pracy doktorskiej.**

Przekładnia z cieczą magnetoreologiczną zastąpić może: sprzęgło podatne, sprzęgło sterowalne i przekładnię. Umożliwia ona płynną zmianę obrotów. Badania w takim kontekście nie są znane w

literaturze przedmiotu. Idea wpływu wartości napięcia zasilającego cewkę jako wielkości sterującej w czasie obrotami wału wyjściowego jest pokazana na rys. 3.2 (nie uwzględniono bezwładności poszczególnych elementów wirujących sprzęgła). Z idei tej wynika dobór regulatora generującego sygnał napięciowy dla cewki powodujący powstanie pola magnetycznego dla uzyskania zadanej prędkości obrotowej. **Brak badań teoretycznych i eksperymentalnych regulacji prędkości obrotowej zespołu napędowego w zmiennych warunkach pracy jest podstawą do postawienia tezy o możliwości uzyskania płynnej regulacji prędkości obrotowej zespołu napędowego.**

Dla realizacji postawionej tezy Autor przedstawił etapy wykonania badań teoretycznych i eksperymentalnych, są to:

a) opracowanie modelu teoretycznego do analizy parametrów pracy przekładni i przeprowadzenie badań symulacyjnych,
b) budowa stanowiska do badań eksperymentalnych,
c) badania doświadczalne do wyznaczenia zakresu pracy sprzęgła z cieczą magnetoreologiczną dla różnych stanów obciążenia.

Podstawowe zależności teoretyczne opisujące przekładnię z cieczą magnetoreologiczną zostały przedstawione w rozdziale 4. Rozważania te uwzględniają potrzebę określenia zależności przenoszonego momentu przez przekładnię w funkcji napięcia prądu zasilającego cewkę; z dobrą zgodnością realizuje to wielomian II stopnia. Badania symulacyjne przekładni magnetoreologicznej przeprowadzone przez Autora pokazują wpływ skokowego przyłożenia napięcia na wzrastającą z czasem wartość momentu obrotowego i wartość opóźnienia wynoszącą 20 ms.

Autor nie podał po jakim czasie od przyłożenia napięcia sterującego osiąga się maksymalną wartość przenoszonego momentu (rys.4.3 i 5.7).

Do przeprowadzenia badań eksperymentalnych Autor opracował model stanowiska do symulacji pracy przekładni magnetoreologicznej w warunkach występowania obciążenia. Model ten uwzględnia dynamikę ruch i jest opisany równaniem różniczkowym I rzędu. Jednym z trybów pracy przekładni magnetoreologicznej jest tryb bezpiecznika obciążenia w układzie napęd – obciążenie. Interesujący jest przebieg symulowanej regulacji prędkości kątowej, rys.5.19–5.21 z oscylacyjnym zachowaniem się w fazie początkowej prędkości wału napędzanego. Wały znajdowały się pod stałym obciążeniem. Dalsze badania Autor przeprowadził dla zmiennego obciążenia. **Wnioskiem z przeprowadzonych symulacji jest brak istotnego wpływu zmian obciążenia na proces regulacji prędkości wyjściowej.**

Bardzo ważnym aspektem badań Autora jest przeprowadzenie symulacji z uwzględnieniem różnych warunków pracy, którymi są :

– zabezpieczenie przed nadmiernym obciążeniem (mechaniczny bezpiecznik w układzie napęd-obciążenie),
– regulacja prędkości kątowej wału wyjściowego dla stałych i zmiennych obciążeń,
– praca przekładni ze zmienną prędkością wału wejściowego.

Badania symulacyjne przekładni jako elektromechanicznego bezpiecznika w układzie napęd-obciążenie pokazały możliwość jego efektywnego działania z możliwością regulacji obciążenia poprzez zmianę napięcia na zaciskach cewki przekładni, rys. 5.17–5.18.

Dalsze badania symulacyjne pokazały, że jest możliwa regulacja prędkości kątowej przekładni magnetoreologicznej, rys. 5.19–5.21. Bardzo ważnym trybem pracy przekładni jest tryb ze zmiennym obciążeniem i stałą oraz zmienną prędkością wału wyjściowego. Również w tym przypadku wyniki symulacji potwierdzają. Autor przeanalizował również przypadek zmiennej prędkości wału wejściowego przy stałej prędkości kątowej wału wyjściowego. **Badania symulacyjne potwierdziły płynność regulacji wartości prędkości kątowej i obciążenia zespołu napędowego z cieczą magnetoreologiczną.**

Szczególnie wartościowym rozdziałem pracy doktorskiej mgra inż. Adama Rosiakowskiego są badania eksperymentalne potwierdzające postawioną tezę pracy udowodnioną na drodze symulacji i sprawdzona eksperymentalnie. Autor szczegółowo opisał stanowisko, aparaturę pomiarową i zakres badań eksperymentalnych. Badania eksperymentalne potwierdziły cel pracy jakim była możliwość regulacji prędkości kątowej zespołu napędowego przez przekładnię magnetoreologiczną. Badania eksperymentalne w pełni potwierdziły wyniki przeprowadzonych symulacji.

Istotne wyniki pracy Doktoranta to:

a) **wspomniana już możliwość płynnej regulacji przenoszonego momentu obrotowego przez przekładnię magnetoreologiczną,**
b) **szybka reakcja układu na zmianę momentu rzędu kilkudziesięciu milisekund,**
c) **wykazanie własności przekładni jako bezpiecznika obciążenia,**
d) **pokazanie możliwości regulacji prędkości kątowej wału wyjściowego na zadanym poziomie i przy różnym obciążeniu i różnej prędkości wału wejściowego,**
e) **opracowane modele teoretyczne i symulacyjne dobrze odzwieciedlały układ rzeczywisty.**

Ten ostatni wynik ma szczególne znaczenie, gdyż pozwala na szeroką analizę teoretyczną pracy sprzęgła z cieczą magnetoreologiczną.

3. Uwagi

W trakcie czytania pracy zauważyłem drobne nieścisłości językowe co nie umniejsza wartości wyników osiągniętych przez Autora. Te drobne nieścisłości omówiłem z Doktorantem.

4. Podsumowanie

Doktorant dokonał szczegółowej analizy literatury przedmiotu na podstawie której sformułował tezę swej pracy **o możliwości uzyskania płynnej regulacji prędkości obrotowej zespołu napędowego z zastosowaniem cieczy magnetoreologicznej.** Praca doktorska mgra inż. Adama Rosiakowskiego potwierdziła w całej rozciągłości, poprzez analizę teoretyczna, symulacje komputerowe i badania eksperymentalne słuszność postawionej tezy. Wymagało to od Doktoranta rozległej wiedzy i wykonania szeregu badań eksperymentalnych. Przeprowadzone badania jednoznacznie świadczą o wysokich umiejętnościach Doktoranta do prowadzenia badań naukowych zaś wnioski końcowe pracy wskazują na szereg problemów do dalszych kierunków badań.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgra inż. Adama Rosiakowskiego spełnia wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę do Rady Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie mgra inż. Adama Rosiakowskiego do publicznej obrony recenzowanej pracy.