

Dr hab. inż. Ryszard Jasiński, prof. PG
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
e-mail: ryszard.jasinski@pg.edu.pl
tel. 603072499

Gdańsk, 01.09.2023



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Kapłona
pt.: Konstrukcja i sterowanie przetwornika zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol

1. Uwagi wstępne

Recenzję rozprawy wykonano na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej, pismo nr DIM.075.333.2023 Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej dr. hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP z dnia 05.07.2023 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

Recenzowana praca, będąca przedmiotem rozprawy, obejmuje 100 stron i składa się ze streszczenia w języku angielskim i polskim, wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, 6 rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 63 pozycje. Praca została napisana w języku polskim.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki.

2. Ocena doboru tematu rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Kapłona koncentruje się na badaniach przetworników zbudowanych na bazie kompozytu silikon-etanol. Przetworniki wykorzystują nowy materiał, który można uznać za materiał kompozytowy zmiennofazowy, ponieważ zachodzi w nim przemiana fazowa. Można go też zaklasyfikować jako materiał z termiczną pamięcią kształtu, gdyż pod wpływem wzrostu temperatury ma on zdolność do znacznych zmian wymiarów, osiągając nawet wydłużenie o 100%. Kompozyt składa się z osnowy z gumy silikonowej, w której osadzone są mikropęcherzyki wypełnione etanolem.

Po raz pierwszy przedstawiono budowę nowego kompozytu silikon-etanol w publikacji „*Soft material for soft actuators*” (autorzy: A. Miriyev, K. Stack, i H. Lipson) w 2017 roku.

Doktorant dokonał przeglądu literatury, w której przedstawiono zaproponowane do tej pory koncepcje budowy przetworników wykorzystujących kompozyt silikon-etanol. Stwierdzono, że w żadnej publikacji nie sformułowano i nie opisano wystarczająco wnikliwie sposobów i zasad, które mogą być wykorzystane

do projektowania przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol. W dostępnych Autorowi publikacjach praktycznie nie przedstawiono żadnych badań symulacyjnych i doświadczalnych, dotyczących sterowania tymi przetwornikami. Dotyczy to w szczególności budowy serwonapędu, w którym występuje sprzężenie zwrotne i regulator. W większości przypadków, działanie prezentowanych przetworników wynikało tylko z ukształtowania ich konstrukcji, dzięki której generowały przemieszczenia w mniej lub bardziej zamierzony sposób. Ponadto, nigdzie nie podjęto szerszych badań nad minimalizacją albo kompensacją wad zastosowanego kompozytu, na przykład poprzez odpowiednią konstrukcję albo właściwe sterowanie.

Z przeglądu literatury wynika, że badania nad konstrukcją i sterowaniem przetworników wykonanych na bazie kompozytu silikon-etanol, nie zostały dotychczas wystarczająco dokładnie przeprowadzone. Należy podkreślić, że tematyka ta jest aktualna i potrzebna oraz badania nad możliwościami zastosowania kompozytu silikon-etanol są dopiero w początkowej fazie. W związku z tym, uważam za słuszne przeprowadzenie przez Doktoranta takich badań w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

Prezentowana praca wychodzi na przeciw tym oczekiwaniom, a Doktorant zaprezentował komplementarne i systemowe podejście do rozwiązania problemu związanego z konstrukcją i sterowaniem przetwornika zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol. Należy podkreślić, że Autor pracy zbudował jako pierwszy serwonapęd z takim przetwornikiem oraz zaproponował metodę sterowania nim. Wykonał badania przetworników z zastosowaniem kompozytu silikon-etanol.

Uważam, że mgr inż. Tomasz Kapłon, słusznie zajął się w swojej rozprawie konstrukcją i sterowaniem przetwornika zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol, gdyż to rozwiązanie znakomicie wpisuje się w potrzeby rozwijającego się rynku nowych technologii. Podjęty przez Doktoranta w rozprawie problem badawczy jest uzasadniony.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Zasadnicza treść rozprawy zawarta jest w 6 rozdziałach. Treść rozdziałów jest powiązana z tytułem rozprawy i stanowi jego rozwinięcie oraz odpowiada sformułowanym celom rozprawy.

We wstępie Autor przedstawia bazowe informacje nt. podjętego w pracy problemu badawczego, odwołując się do prac naukowych z tego zakresu, jednocześnie przedstawia uzasadnienie dla podjęcia przedmiotowego tematu.

W rozdziale 1 Autor dokonał przeglądu aktualnego stanu wiedzy. W pierwszej kolejności opisuje materiały zmieniające fazę oraz przetworniki bazujące na przemianie ciecz-gaz. Następnie przedstawia sposoby wytwarzania kompozytu silikon-etanol, cykl jego pracy oraz jego właściwości. Podaje jakie czynniki wywołują zmiany wymiarów kompozytu silikon-etanol oraz podstawy teoretyczne działania kompozytu.

Na podstawie przeglądu literatury Autor przedstawił kilka konstrukcji przetworników z zastosowaniem kompozytu silikon-etanol. Doktorant stwierdził, że badania przetworników wykonanych na bazie kompozytu silikon-etanol, nie zostały dotychczas wystarczająco dokładnie przeprowadzone.

Z tych powodów Doktorant w swojej pracy zajął się badaniami nad konstrukcją i sterowaniem przetworników wykonanych na bazie kompozytu silikon-etanol.

Rozdział 2 zawiera między innymi zakres i cele pracy. Autor sformułował tezę główną pracy:

„możliwe jest zbudowanie napędu z przetwornikiem wykonanym na bazie kompozytu silikon-etanol, który może generować siły rzędu kilkudziesięciu N i przemieszczenia liniowe rzędu kilku mm”

oraz tezę szczegółową:

„serwonapęd, w którym zastosowany jest przetwornik mieszkowy o długości początkowej 57,6 mm i średnicy 27 mm, może generować siłę 35 N i uzyskiwać wydłużenie ok. 6 mm oraz uzyskiwać dokładność pozycjonowania $\pm 0,1$ mm”.

Rozdział 3 zawiera opis budowy i wyniki badań przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol. Autor wykonał badania prototypów dwóch konstrukcji przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol o różnych koncepcjach budowy. Pierwszą z nich był przetwornik rurkowy, w którym rolę tłoka mógł pełnić sam kompozyt przesuwający się wewnątrz rurki. W kompozycie znajdowała się zatopiona w nim spiralna grzałka. Drugą koncepcją był przetwornik mieszkowy, który składał się z metalowego mieszka wypełnionego kompozytem silikon-etanol. We wnętrzu umieszczona była także spiralna grzałka z drutu oporowego, zatopiona w kompozycie.

W celu przebadania przetworników Doktorant zbudował dwa stanowiska badawcze. Jedno przeznaczone było do badania przemieszczenia bez obciążenia, a drugie do badania siły blokującej.

Przeprowadzono badania sześciu prototypów przetworników rurowych (trzy o takiej samej długości początkowej rdzenia kompozytowego i o różnych średnicach oraz trzy o takiej samej objętości rdzenia kompozytowego i o różnych średnicach) oraz trzy różne przetworniki mieszkowe.

Doktorant zaproponował algorytm projektowania przetworników mieszkowych. Założył, że w procesie projektowania znane są parametry wyjściowe, czyli przede wszystkim wymagana siła i przemieszczenie, jakie ma uzyskać napęd.

Rozdział 4 zawiera, opracowany przez Autora, model komputerowy umożliwiający symulację pracy przetwornika mieszkowego, zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol. Wyniki z badań symulacyjnych (temperatura wewnątrz przetwornika, wydłużenie przetwornika w czasie, siła blokująca) są zbieżne z wynikami uzyskanymi podczas eksperymentu.

Rozdział 5 zawiera wyniki badań sterowania napędem zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol w układzie zamkniętym.

Ze względu na większą trwałość przetwornika mieszkowego w porównaniu do tłokowego, Autor wykorzystał przetwornik mieszkowy w serwonapędzie. Dodatkową zaletą takiego przetwornika jest brak tarcia kompozytu o ścianki tulei, będącej obudową zewnętrzną. Zbudowane stanowisko umożliwiło badanie napędu liniowego, w którym przetwornik mieszkowy oparty na kompozycie silikon-etanol poruszał platformą zamontowaną na dwóch pionowych prowadnicach. Jako źródło sygnału sprzężenia zwrotnego położenia, wykorzystano laserowy czujnik odległości. Do sterowania mocą, tj. natężeniem prądu podawanego do grzałki zastosowano sterownik mocy PWM, a do sterowania całością napędu zastosowano płytkę z mikrokontrolerem Arduino Mega 2560.

W pierwszych testach zbadano odpowiedź napędu na skokowo zadane przemieszczenie. Zbadano działanie napędu przy zastosowaniu regulatorów P oraz PI oraz z zastosowaniem dwóch różnych czujników położenia o różnej dokładności. Najlepszą dokładność pozycjonowania uzyskano przy zastosowaniu regulatora PI oraz czujnika HG-1050. Dla przemieszczenia 6 mm dokładność pozycjonowania wynosiła poniżej 0,1 mm.

Wykonano także badania odpowiedzi napędu z różnymi regulatorami na zadane skokowo przemieszczenie równe 2, 4 i 6 mm. We wszystkich przypadkach zastosowano źródło zasilania o napięciu 13,5 V. Najniższe wartości ustalonego uchybu osiągnięto przy zastosowaniu regulatora PI i były one zbliżone do osiągniętych przy zastosowaniu regulatora P.

Zwiększenie wartości napięcia zasilania, a tym samym mocy grzania spowodowało skrócenie czasu uzyskania zadanej pozycji napędu. Zwiększenie napięcia zasilania 2,5-krotnie tzn. z 9 V do 22,5 V, skróciło czas pierwszego osiągnięcia zadanej pozycji ponad 5-krotnie.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie wyników badań.

W pracy występują pewne błędy stylistyczne, literowe i redakcyjne. Błędy te jednak nie mają znaczenia w ogólnej ocenie pracy, zwłaszcza w ocenie merytorycznej. Zawarte w pracy rysunki i schematy w większości przypadków są dobrej jakości i posiadają wyczerpujący opis. Literatura jest aktualna i dobrana zgodnie z tematem pracy. Układ rozprawy i podział treści między poszczególnymi rozdziałami jest logiczny.

4. Ocena rozprawy

Dokonując oceny rozprawy należy podkreślić, że jej ogólna forma i zakres podyktowane zostały realizacją celów i udowodnieniem tezy rozprawy.

Za główne osiągnięcia mgr. inż. Tomasza Kapłona uważam:

1. Zbudowanie kilku stanowisk do badania różnych konstrukcji przetworników wykonanych na bazie kompozytu silikon-etanol.

2. Wykonanie badań eksperymentalnych prototypów dwóch konstrukcji przetworników zbudowanych na bazie kompozytu silikon-etanol o różnych koncepcjach budowy. Pierwszą z nich był przetwornik rurkowy, w którym rolę tłoka mógł pełnić sam kompozyt przesuwający się wewnątrz rurki. W samym kompozycie znajdowała się zatopiona w nim spiralna grzałka. Rurowe przetworniki wykonane na bazie kompozytu silikon-etanol, mogły osiągnąć wydłużenie w granicach 30-35%, po nagraniu do 75°C. Drugą koncepcją był przetwornik mieszkowy, który składał się z metalowego mieszka wypełnionego kompozytem silikon-etanol. W przetwornikach mieszkowych wpływ na uzyskiwane odkształcenia znaczenie miały parametry zastosowanych mieszków. Wartości uzyskiwanych wydłużeń bezwzględnych w dużej mierze zależały od zastosowanej geometrii przetworników i użytej objętości kompozytu.
3. Opracowanie algorytmu projektowania przetwornika mieszkowego wykonanego na bazie kompozytu silikon-etanol.
4. Stworzenie modelu komputerowego, umożliwiającego symulację pracy przetwornika mieszkowego, wypełnionego kompozytem silikon-etanol, na podstawie modyfikacji wzorów opisujących działanie kompozytu silikon-etanol. Wykonanie badań symulacyjnych.
5. Opracowanie układu regulacji serwonapędu (regulatory: P, PI, kaskadowy) z przetwornikiem wykonanym na bazie kompozytu silikon-etanol.
6. Zbudowanie i przebadanie napędu z przetwornikiem mieszkowym przy zmiennych warunkach odprowadzenia ciepła z przetwornika, przy zmianie obciążenia napędu, przy różnych napięciach zasilania. Napęd z przetwornikiem wykonanym na bazie kompozytu silikon-etanol mógł wygenerować siłę 35 N, osiągnąć przemieszczenie 6 mm oraz uzyskać dokładność pozycjonowania $\pm 0,1$ mm.

Podsumowując, uważam że omówiona konstrukcja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Kapłona oraz sposób opracowania materiału badawczego, a także forma przeprowadzonej analizy i przyjęta metodyka badań są właściwe dla tego rodzaju prac. Doktorant wykazał się dużą wiedzą ogólną, dobrą znajomością przedmiotu badań oraz opanowaniem metod analitycznych i numerycznych stosowanych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

5. Pytania szczegółowe

1. W rozdziale 3 (podrozdział 3.3) Autor do pomiaru temperatury wewnątrz przetwornika zastosował termopary. W trakcie badań, w niektórych przypadkach wewnątrz przetwornika były umieszczane nawet trzy termopary. Proszę chociaż dla jednego badania przetwornika przedstawić na wykresie

przebiegi temperatury mierzone w kilku miejscach kompozytu silikon-etanol. Proszę przedstawić analizę otrzymanych wyników.

2. Na rysunku 32 przedstawiono naprężenie blokujące dla przetworników rurowych o równej wysokości. Wskazane jest, by Autor dokładnie przeanalizował wyniki przedstawione na tym rysunku.
3. W podrozdziale 3.5 Autor stwierdził, że ze względu na brak szczelnego zamknięcia przetworników rurowych (powierzchni czołowej kompozytu), dochodzi do wypływu („ucieczki”) etanolu z kompozytu do otoczenia, co przekłada się na niską żywotność przetwornika. Czy zastosowanie pierścieni uszczelniających w tłoku przetworników rurowych nie zwiększyłoby szczelności takiego przetwornika (kompozytu)?
4. W podrozdziale 3.6 Autor przedstawił algorytm projektowania przetwornika mieszkowego wykonanego na bazie kompozytu silikon-etanol. Proszę podać zalecane materiały, z których należy wykonać mieszek oraz wartości współczynnika sprężystości mieszka przetwornika.
5. W rozdziale 5 Doktorant w badaniach przetworników stosuje różne czujniki do określenia położenia. Jaką dokładność pomiaru czujników odległości Doktorant zaleca do zastosowania w napędzie? Jaki wpływ ma dokładność pomiaru odległości czujników na czas uzyskania konkretnej pozycji przetwornika? .
6. Proszę wyjaśnić dlaczego dla napędu z regulatorem kaskadowym zwiększenie napięcia zasilania 2,5-krotnie tzn. z 9 V do 22,5 V, skróciło czas pierwszego osiągnięcia zadanej pozycji aż ponad pięciokrotnie.
7. Czy Doktorant zastanawiał się nad zaprojektowaniem i wykonaniem komercyjnego, kompaktowego serwonapędu wykorzystującego kompozyt silikon-etanol?

6. Wniosek końcowy oceny rozprawy

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- Doktorant dokonał trafnego wyboru tematyki swojej pracy oraz poprawnie określił jej zakres,
- cele pracy zostały osiągnięte w zakresie przyjętym przez Autora, gdyż uzasadnione twierdzenia Autora zostały ujęte w tezie pracy, a prezentowane wyniki badań są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych symulacjach, eksperymentach i mogą służyć do dalszych prac badawczych,
- Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- rozprawa zredagowana jest poprawnie,

- praca dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy, a w wielu elementach wnosi do nich nowe treści.

Powyższe argumenty świadczą o umiejętnościach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Stwierdzam, że praca mgr. inż. Tomasza Kapłona pt.: „Konstrukcja i sterowanie przetwornika zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol” (promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, w rozumieniu ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 30 sierpnia 2018 r. poz. 1668).

W związku z tym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Tomasza Kapłona i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ryszard Jasiński

