



Gliwice, 21.08.2023 r.

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Kapłona

„Konstrukcja i sterowanie przetwornika zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol”

Opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej,  
pismo nr DIM.075.333.2023 z dnia 05.07.2023 r. wynikające z uchwały Rady Dyscypliny  
Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 03 lipca 2023 r. nr 6/III/07/2023.

### 1. Uwagi ogólne

Materiały inteligentne znajdują coraz większą liczbę zastosowań we współczesnych środkach technicznych i nowoczesnych systemach mechatronicznych ze względu na coraz wyższe wymagania w zakresie ich miniaturyzacji, efektywności, niezawodności, szybkości działania czy też energochłonności. Nieklasyczne rozwiązania napędowe, bazujące na zastosowaniu przetworników piezoelektrycznych, elastomerów dielektrycznych, czy też stopów z pamięcią kształtu otwierają przed konstruktorami i inżynierami nowe możliwości aplikacyjne. Poszerzają pole możliwych rozwiązań konstrukcyjnych układów napędowych, w których eliminowane są tradycyjne przetworniki elektromechaniczne wraz z często złożonym łańcuchem kinematycznym i ruchomymi elementami o istotnej masie, która wpływa na bezwładność układu.

W tym świetle tematyka przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej z pewnością jest istotna z punktu widzenia współczesnej inżynierii mechanicznej, ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju techniki napędowej nowoczesnych systemów mechatronicznych. Podjęta przez Doktoranta tematyka pracy doktorskiej, dotycząca konstrukcji i sterowania przetworników, w których działaniu stosowane jest zjawisko zmiany fazy ciekłej na gazową wpisuje się w kierunki rozwojowe współczesnej inżynierii mechanicznej i należy uznać za szczególnie trafione i zasadne ukierunkowanie działalności naukowej Doktoranta na tak zidentyfikowany obszar badawczy.

Na tle scharakteryzowanego w przedstawionej do oceny pracy nowego i dynamicznie rozwijanego w ostatnich latach obszaru badawczego dotyczącego materiałów inteligentnych, których działanie bazuje na zmianie fazy skupienia (Phase Change Materials – PCM) Doktorant zdefiniował swój zakres badań oraz nakreślił główne cele swojej rozprawy doktorskiej. Zdefiniował tezę główną, w której założył, że możliwe jest zbudowanie napędu z przetwornikiem wykonanym na bazie kompozytu silikon-etanol, który może generować siły rzędu kilkudziesięciu Niutonów i przemieszczenia liniowe rzędu kilku mm. Tak postawioną tezę uszczegółowił, zakładając wymiary i parametry pracy serwonapędu utworzonego na bazie opracowanego przetwornika. Postawiona przez Doktoranta teza szczegółowa dotyczy więc opracowania serwonapędu bazującego na przetworniku w postaci kompozytu silikon-etanol o długości początkowej 57,6 mm i średnicy 27 mm, który ma możliwość generowania siły 35 N i przemieszczenia rzędu 6 mm, przy jednoczesnym zapewnieniu dokładności pozycjonowania 0,1 mm.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi dosyć zwięzłe sprawozdanie z procesu projektowo-konstrukcyjnego przetwornika i bazującego na jego działaniu serwonapędu, a także raport z przeprowadzonych badań doświadczalnych opracowanych prototypów projektowanych układów. Całość poprzedzona jest przeglądem literatury oraz prezentacją aktualnego stanu wiedzy, na tle którego Doktorant przedstawił swoje osiągnięcia.

## 2. Ocena rozprawy

Autor zawarł swoją pracę na 100 stronicach i podzielił ją na sześć rozdziałów, które uzupełnił wykazem literatury. Zamieścił w nim 63 pozycje literatury, spośród których najstarsza wydana była w 1993 roku, najnowsze natomiast – w 2022 roku. Zdecydowana większość obejmuje pozycje z ostatnich lat i są to opracowania angielskojęzyczne (poza jedną pozycją – podręcznikiem z zakresu metaloznawstwa i podstaw nauki o materiałach). Trzy spośród cytowanych pozycji literaturowych to opracowania, których doktorant jest współautorem. Ponadto, w pracy Autor zawarł 97 rysunków, 14 tablic oraz 15 ponumerowanych zależności matematycznych. Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska

stanowi jasne i precyzyjne opracowanie, w którym Doktorant nakreślił zarówno cel podejmowanych przez siebie badań, przedstawił sprawozdanie z wykonanych prac, jak i krótko scharakteryzował wnioski wynikające z prowadzonych rozważań.

Swoją pracę Doktorant rozpoczął od jej streszczenia w języku polskim, wykazu najważniejszych oznaczeń i skrótów użytych w opracowaniu oraz krótkiego wstępu do poruszanych zagadnień.

W rozdziale pierwszym, podzielonym na dziewięć podrozdziałów Autor przedstawił przegląd aktualnego stanu wiedzy, omawiając kolejno dostępne w literaturze podstawowe informacje dotyczące materiałów zmieniających fazę i przetworników bazujących na przemianie fazowej ciec-z-gaz. Scharakteryzował krótko kompozytowe materiały zmieniające fazę, w tym kompozyty silikon-etanol, w przypadku których omówił ich wytwarzanie, właściwości, zastosowania oraz przedstawił podstawy teoretyczne działania tego typu kompozytów wraz z opisującymi je zależnościami matematycznymi, jak również metody nagrzewania przetworników wytworzonych na bazie kompozytu silikon-etanol. Dokonany przegląd literatury Doktorant podsumował, wskazując na najważniejsze aspekty badań dotyczących tego typu układów oraz podkreślając braki w zakresie opracowań, w których przedstawiono konstruowanie oraz sterowanie przetwornikami na bazie kompozytu silikon-etanol, co stało się asumptem do podjęcia działań opisanych w kolejnych rozdziałach przedstawionego do recenzji opracowania.

W obejmującym nieco ponad trzy stronicie tekstu rozdziale drugim Autor definiuje cel i tezę swojej pracy, wskazując, że sama idea zastosowania przemian fazowych do generowania przemieszczeń jest znana od wielu lat, mimo to koncepcja zastosowania w tym celu materiału kompozytowego łączącego fazę stałą wraz z fazą ciekłą przemienianą w fazę lotną jest ideą nową i wartą dalszych rozważań. W związku z tym, Doktorant definiuje koncepcję przetwornika na bazie kompozytu silikon-etanol oraz precyzuje główne i szczegółowe cele i tezę swojej pracy. Postawione przez Doktoranta tezy zostały już przytoczone w niniejszej recenzji, zaś jako cele swojej pracy wskazuje on cel główny, którym jest „pozyskanie wiedzy oraz sformułowanie podstaw teoretycznych dotyczących działania i projektowania oraz

modelowania przetwornika, w którym zastosowano kompozyt silikon-etanol”, na który składają się następujące cele szczegółowe:

- wykonanie wstępnych badań doświadczalnych kompozytu silikon-etanol i opracowanie dwóch wersji przetworników (napędów),
- zaprojektowanie wykonanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol,
- opracowanie modelu komputerowego przetwornika bazującego na kompozycie silikon-etanol i wykonanie badań symulacyjnych,
- opracowanie układu regulacji serwonapędu z przetwornikiem opartym na kompozycie silikon-etanol i przeprowadzenie badań doświadczalnych potwierdzających tezy.

Rozdział trzeci dotyczy konstruowania i badania przetworników, których działanie oparto na zastosowaniu kompozytu silikon-etanol. W ramach rozdziału Autor scharakteryzował stosowany kompozyt oraz przedstawił koncepcje przetworników, w których może być on z powodzeniem zastosowany w roli czynnika napędowego. Doktorant przedstawił także stanowiska opracowane w celu prowadzenia laboratoryjnych badań doświadczalnych przetworników wraz z ich schematami blokowymi. W ramach prowadzonych prac doktorant wykonał oraz przeprowadził badania dwóch typów przetworników, z których pierwszy typ nazywa przetwornikiem rurkowym, zaś drugi przetwornikiem mieszkowym, w którym kompozyt silikon-etanol odseparowany jest od otoczenia za pomocą metalowego mieszka o określonej sprężystości. W rozdziale zawarto także rezultaty przeprowadzonych badań opracowanych przetworników wraz z otrzymanymi eksperymentalnie charakterystykami w postaci wydłużenia będącego odpowiedzią na wymuszenie w postaci podgrzewania kompozytu. Otrzymane eksperymentalnie rezultaty zestawiono także z wynikami rozważań teoretycznych, otrzymując zadowalającą zbieżność wyników. Przeprowadzone badania dotyczyły także trwałości opracowanych przetworników i powtarzalności ich odkształceń w funkcji liczby wykonanych cykli pracy. W ostatnim podrozdziale (3.6) Autor przedstawił analityczne podstawy projektowania przetworników mieszkowych, wykazując zbieżność otrzymanych rezultatów w postaci wyznaczonych charakterystyk przetworników względem



rezultatów pomiarów eksperymentalnych.

W kolejnym rozdziale rozprawy Doktorant przedstawił rezultaty badań symulacyjnych przetwornika mieszkowego wspomaganego komputerowo z użyciem oprogramowania Matlab-Simulink. Rozdział obejmuje siedem stron i wydzielono w nim jeden podrozdział. Przedstawione charakterystyki wyznaczone w wyniku symulacji wykazują zadowalającą zbieżność z rezultatami przeprowadzonych badań doświadczalnych.

Rozdział piąty przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej również zawiera jeden podrozdział, w którym Doktorant przedstawił rezultaty badań sterowania i pozycjonowania serwonapędu utworzonego z zastosowaniem opracowanego przetwornika mieszkowego na bazie kompozytu silikon-etanol. Autor w sposób klarowny przedstawił układ sterowania przetwornikiem w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, jak i opracowane stanowisko laboratoryjne do badania dokładności pozycjonowania utworzonego serwonapędu. Szczegółowo opisał przeprowadzone pomiary, w trakcie których do kontroli przemieszczenia przetwornika stosowane były regulatory typu P oraz PI, zaś skuteczność regulacji analizowana była zarówno bez, jak i z obciążeniem masą zewnętrzną przetwornika oraz w przypadkach jego pionowej, jak i poziomej orientacji. W celu poprawy dynamiki pracy rozpatrywanego układu Doktorant zaproponował modyfikacje, w których stosowane były odpowiednio chłodzenie przetwornika strumieniem powietrza wymuszonym przez kontrolowany przez opracowany układ sterowania wentylator oraz ogrzewanie przetwornika wzmacniane poprzez zwiększenie napięcia zasilania grzałki elektrycznej, które Doktorant określił mianem forsowania napięciem prądu elektrycznego. Otrzymane rezultaty prowadzonych badań Autor przedstawił w formie graficznej, jak i zestawień tabelarycznych.

W ostatnim rozdziale zatytułowanym „Podsumowanie i wnioski” Doktorant omówił zawartość poszczególnych rozdziałów pracy oraz odniósł się do zakładanych celów pracy i wskazał na ich osiągnięcie w rezultacie przeprowadzonych badań. Nakreślił także krótko kierunki dalszych badań.

Jako główne osiągnięcia Doktoranta uważam skonstruowanie serwonapędu z zastosowaniem przetwornika na bazie kompozytu silikon-etanol, który współpracując

z zaprojektowanym układem regulacji automatycznej, osiągnął zakładane parametry w zakresie generowanej siły, przemieszczenia oraz dokładności pozycjonowania. Ponadto, Doktorant zaproponował algorytm projektowania przetwornika mieszczącego ze względu na jego oczekiwane wydłużenie i siłę blokującą, jak również opracował model komputerowy tego typu przetworników z zastosowaniem oprogramowania Matlab-Simulink. Opracowane narzędzia oraz metodologia mogą stanowić skuteczne rozwiązanie wspomagające prace badawcze w zakresie projektowania, konstruowania, doboru parametrów, jak i analizy samych przetworników bazujących na kompozycie silikon-etanol, jak i utworzonych z ich użyciem układów napędowych. Doktorant wykazał się także umiejętnością zaplanowania i przeprowadzenia prac badawczych, w tym opracowania niezbędnych stanowisk laboratoryjnych, a także analizy otrzymanych rezultatów.

### 3. Uwagi krytyczne

W odniesieniu do opiniowanej pracy przedstawiam następujące uwagi krytyczne i oczekuję od Doktoranta odniesienia się do nich w trakcie publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Istotnym zastrzeżeniem w odniesieniu do przedstawionego do oceny egzemplarza rozprawy doktorskiej jest jej niestaranne przygotowanie pod względem edycyjnym, a także językowym, stylistycznym. W treści pracy dostrzec można niestety liczne błędy w tym zakresie, które wskazują na niestaranne przygotowanie opracowania. Błędy te dotyczą zarówno stylistyki i stosowanych zwrotów, błędów interpunkcyjnych, niewłaściwego składu i łamania tekstu pracy czy wyjustowania poszczególnych akapitów. Autor nie stosuje interpunkcji po zależnościach matematycznych, które stanowią część zdania, nie zachowuje właściwych odstępów pomiędzy akapitami, rysunkami i tablicami, których formatowanie również nie jest jednolite. Nieuzasadnione wydaje się także wydzielenie podrozdziałów 4.1 oraz 6.1 w rozdziałach 4 i 6, w których nie zawarto żadnej treści poza tymi podrozdziałami. Zauważone błędy w tym zakresie naniesiono bezpośrednio na dostarczonym egzemplarzu opracowania, który przekazany zostanie Autorowi. Świadczą one o nienależytej staranności w zakresie

przygotowania opracowania do druku, co niestety istotnie wpływa na odbiór opracowania przez czytelnika. Błędy te nie umniejszają jednak wartości merytorycznej opracowania, a jedynie negatywnie wpływają na jego odbiór.

W zakresie zdefiniowanej przez Doktoranta tezy szczegółowej postawionej w rozprawie doktorskiej, w świetle precyzyjnie zdefiniowanych w niej parametrów geometrycznych oraz siły, przemieszczenia, jak i dokładności pozycjonowania przetwornika, dziwić może brak przyjęcia przez Autora założeń w zakresie czasu osiągania zadanej pozycji przez projektowany serwonapęd. Wszystkie charakterystyki rozpatrywanych układów w przedłożonym do oceny opracowaniu przedstawione są w funkcji czasu. Autor analizuje także szczegółowo wpływ doboru regulatora, parametrów układu sterowania, obciążenia zewnętrznego czy też wartości napięcia prądu elektrycznego zasilającego układ grzewczy na czas osiągnięcia zadanej pozycji przez projektowany układ napędowy. Mimo to parametr ten nie został ujęty pośród parametrów charakteryzujących projektowany serwonapęd, wskazanych w tezie szczegółowej.

Doktorant nie określił w sposób jasny liczby egzemplarzy wykonanych przetworników, które poddano badaniom w trakcie realizacji pracy. Dotyczy to zarówno badania optymalnego udziału procentowego etanolu w tworzonym kompozycie silikon-etanol, które opisano w rozdziale trzecim, jak i rurkowych i mieszkowych przetworników poddanych badaniom, które opisano w kolejnych rozdziałach pracy. Analizując treść pracy należy domniemać, że wykonano jedynie po jednym egzemplarzu każdego spośród badanych układów, co stoi w sprzeczności z przyjętymi zasadami prowadzenia eksperymentalnych badań naukowych, w ramach których powinno się przeprowadzić pomiary na większej liczbie próbek, zaś otrzymane wyniki uśrednić. Celem takich działań jest eliminacja możliwości wpływu na otrzymane rezultaty próbek błędnie wykonanych lub posiadających różnego rodzaju defekty i uszkodzenia. Doktorant nie wskazał także, czy poszczególne pomiary miały charakter powtarzalny, a zawarte w pracy rezultaty są uśrednionymi wynikami pewnej liczby prób. Jedynie w podrozdziale 3.5 przedstawił rezultaty badania trwałości badanych przetworników mieszkowych poddanych badaniom w trakcie realizacji stu cykli odkształcenia.



Związek z powyższą uwagą mogą mieć prawdopodobnie przedstawione w podrozdziale 3.5 rezultaty pomiarów maksymalnego i minimalnego położenia czoła przetwornika w trakcie wykonywania stu cykli przemieszczenia (rysunek 49). Doktorant zauważa: „Przez pozostałe cykle różnica między „górnym” i „dolnym” położeniem oscylowała w okolicach 4 mm za wyjątkiem zaburzonego odcinka pomiędzy 85 i 90 cyklem.”. Brak jednak wyjaśnienia czego owo zaburzenie przebiegu mogło być wynikiem oraz czy badanie to zostało powtórzone z użyciem tego samego lub innego egzemplarza przetwornika.

W podrozdziale 3.3 zawierającym opis stanowisk do badań rozpatrywanych układów Doktorant zawarł sformułowanie: „W trakcie badań, w niektórych przypadkach wewnątrz przetwornika były umieszczone nawet trzy termopary” (str. 37). W treści pracy nie zamieszczono jednak wyjaśnienia celu wprowadzenia wspomnianej redundancji. Stwierdzenie to należy także uznać za nieprecyzyjne – nie określono bowiem konkretnie, w których spośród badanych przetworników owa redundancja miała miejsce, a także dlaczego działanie takie nie obejmowało wszystkich spośród rozpatrywanych układów.

W rozdziale czwartym rozprawy doktorskiej, który dotyczy badań symulacyjnych oraz opracowania modelu przetwornika mieszkowego z użyciem oprogramowania Matlab-Simulink Doktorant wskazuje na złożony rozkład temperatur wewnątrz przetwornika i wzajemne oddziaływanie na siebie obszarów kompozytu o różnej temperaturze. Jednocześnie przyjmuje dosyć znaczne uproszczenie modelu, zakładając uśrednioną temperaturę materiału kompozytowego w całej jego objętości. Pomimo znaczącego uproszczenia, otrzymane wyniki symulacji układu charakteryzuje jednak dosyć wysoka zgodność z rezultatami badań eksperymentalnych. Autor nie precyzuje w swoim opracowaniu czy, a jeśli tak, to w jaki sposób rozważa możliwość bardziej dokładnego odwzorowania rozkładu temperatur w opracowanym modelu, co mogłoby stanowić element wskazania kierunków dalszych badań, o których mowa w podsumowaniu opracowania.

*Płaczek*



#### 4. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że Doktorant udowodnił, że potrafi planować i prowadzić teoretyczne badania naukowe, z zastosowaniem metod analitycznych i numerycznych, jak również badania laboratoryjne stanowiące eksperymentalną weryfikację stawianych tez i przyjętych założeń. Pomimo wymienionych powyżej niedociągnięć i uwag krytycznych, przedstawioną do oceny rozprawę doktorską należy ocenić pozytywnie.

Biorąc pod uwagę uzyskane rezultaty recenzowanej pracy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Kapłona p. t.: „Konstrukcja i sterowanie przetwornika zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol” stwierdzam, że opiniowana praca może być podstawą nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych, zgodnie z wymaganiami określonymi w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742) i wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony.

Z wyrazami szacunku



