



## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Kapłona**  
**pt. „Konstrukcja i sterowanie przetwornika zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol”**  
*wykonanej pod kierunkiem*  
*Prof. dra hab. inż. Andrzeja Mileckiego*

### I. Podstawa formalna opracowania recenzji

Formalną podstawę opracowania niniejszej opinii stanowi pismo z dnia 5.07.2023 o sygnaturze DIM.075.333.2023 wystosowane przez dra hab. inż. Olafa Ciszaka, profesora Politechniki Poznańskiej, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej a informujące o powołaniu przez Radę Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej w dniu 3.07.2023 uchwałą nr 6/III/07/2023 na recenzenta rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Kapłona pt. „Konstrukcja i sterowanie przetwornika zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol” oraz umowa o dzieło nr 0600/2023/140 obejmująca wykonanie recenzji rozprawy.

### II. Ocena pracy doktorskiej

#### 1. Wprowadzenie

Tematyka pracy doktorskiej koncentruje się na zagadnieniach związanych z konstrukcją i oceną pracy siłowników do generowania ruchu liniowego z wykorzystaniem materiału zmiennofazowego w postaci kompozytu silikon-etanol. W zastosowanym materiale pod wpływem zwiększenia temperatury zachodzi przemiana fazowa ciecz-gaz uwięzionego w silikonie etanolu powodując zmianę objętości kompozytu, gdzie dzięki dużej elastyczności silikonu nie następuje degradacja materiału. Przy zmniejszaniu temperatury ogrzanego układu następuje proces odwrotny. Takie zachowanie się materiału zostało wykorzystane do budowy przetworników ruchu, gdzie ukierunkowana ekspansja ogrzewanego kompozytu została wykorzystana do generowania mocy mechanicznej ruchu liniowego dla określonych przemieszczeń i sił. Ze względu na stosunkowo dużą bezwładność procesów termicznych urządzenia takie cechują się dużymi opóźnieniami przy niewielkich przemieszczeniach. Należy tutaj wskazać, że właśnie z tych powodów tę technikę można uznać za wartą uwagi w napędach np. procesów wolnozmiennych nie wymagających dużej mocy, gdzie zastosowanie powszechnie dostępnych napędów elektrycznych i pneumatycznych wymaga zwykle redukcji mocy, stosowania dodatkowych przekładni zwiększających liczbę elementów ruchomych, które muszą być wspierane specjalistycznymi układami sterowania. W porównaniu z tymi rozwiązaniami konstrukcje siłowników bazujących na zmianie objętości materiału roboczego cechują się prostotą i są bardziej ekonomiczne.

W ramach omawianej pracy doktorskiej wykonano szereg badań związanych z oceną właściwości przyjętego do rozważań kompozytu na bazie silikon-etanol, określono jego własności mechaniczne i charakterystyki podczas przemiany fazowej. Doktorant zaproponował rozwiązania konstrukcyjne przetworników do generowania przemieszczeń liniowych, wykonał szczegółowe badania i analizy porównując dwa typy konstrukcji przetwornika. Przedstawiono również model matematyczny opisujący pracę urządzenia oraz zbudowano model numeryczny, który posłużył do badań symulacyjnych układu. W pracy zaproponowano również układ sterowania pracą zaprojektowanych i wykonanych siłowników.

Biorąc pod uwagę powyższe oraz fakt, że analizowany w pracy materiał zmiennofazowy w postaci kompozytu silikon-etanol jest stosunkowo nowym materiałem, a prace związane z jego aplikacjami są nieliczne, podjęcie przez doktoranta tego tematu jest problemem aktualnym oraz nowatorskim i jest celowe i zasadne z punktu widzenia poznawczego i naukowego. Praca ma charakter konstrukcyjny i badawczy. Wyniki prac konstrukcyjnych, modelowania pracy układu i badań symulacyjnych służących opracowaniu algorytmu sterowania stanowią kompleksowe rozwiązanie napędu z punktu widzenia systemów mechatronicznych i praca badawcza w tych obszarach wpisuje się w dyscyplinę inżynierii mechanicznej i dziedzinę nauk inżynieryjno-technicznych.

## 2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Doktorant do recenzji przedstawił pracę w zwartej formie książki w twardej okładce formatu A4 oraz dodatkowo wersję elektroniczną spójną z pracą drukowaną. Praca zawiera 100 stron. Treść pracy została podzielona na 6 rozdziałów z podrozdziałami. Na początku znajduje się spis treści i streszczenie oraz jedna strona spisu ważniejszych oznaczeń. Ostatnia strona pracy zawiera streszczenie w języku angielskim. W pracy zamieszczono 97 rysunków oraz 14 tabel. Spis literatury zawiera 63 pozycje z czego 3 publikacje, których współautorem jest doktorant.

W pracy zasadniczy akcent położono na projekt konstrukcji przetworników i ich badań eksperymentalnych oraz autorskich analiz. Na stronach od 6 do 28 zamieszczono podstawy teoretyczne zagadnienia zaś strony od 29 do 95 zawierają opis i analizę części konstrukcyjnej i eksperymentalnej. Badania własne autora rozprawy obejmują znaczącą część rozprawy.

Rozdział 1 pracy poświęcony jest przeglądowi aktualnego stanu wiedzy. W kolejnych podrozdziałach autor dokonuje wprowadzenia w zagadnienia materiałów zmiennofazowych – określone są podstawowe definicje, budowa i sposoby uzyskiwania kompozytu silikon-etanol oraz jego właściwości. W tej części pracy zamieszczono również podstawy teoretyczne opisu zjawisk zachodzących w materiale podczas podgrzewania w zakresie zmian ciśnienia par etanolu oraz zależności konstytutywnych pomiędzy siłami wewnętrznymi i odkształceniami w materiale. Są one podstawą dalszych rozważań podczas badań i symulacji. W dalszej części doktorant opisał podstawy konstrukcji przetworników bazujących na idei zmiany objętości materiału kompozytowego i generacji kontrolowanych przemieszczeń wraz z opisem technik podgrzewania materiału.

W podsumowaniu doktorant zwrócił uwagę na brak w literaturze jednoznacznych modeli obliczeniowych, które pozwoliłyby przeprowadzić proces projektowania tego typu siłowników i skutecznie kontrolować i sterować ich pracą.

Rozdział 2 zawiera cel i zakres pracy. Doktorant przedstawił koncepcję konstrukcji siłownika do badań oraz określił cel główny jako „pozyskanie wiedzy oraz sformułowanie podstaw teoretycznych dotyczących działania i projektowania oraz modelowania przetwornika, w którym zastosowano kompozyt silikon-etanol”. Cel główny uzupełniono czterema celami szczegółowymi. Autor rozprawy sformułował również tezę pracy wskazując na możliwość budowy napędu z przetwornikiem kompozytu silikon-etanol z generacją siły rzędu kilkudziesięciu Newtonów i kilkumilimetrycznych przemieszczeń. Zdefiniowano również tezę szczegółową określając jednoznaczne wymiary siłownika i uzyskiwane przezeń parametry pracy: siłę 35N, przemieszczenie 6mm i dokładność pozycjonowania  $\pm 0,1$ mm.

W rozdziale 3 autor przedstawił wyniki badań materiału kompozytowego odnośnie uzyskiwanych przemieszczeń i sił potwierdzając założenia projektowe przyjęte na podstawie literatury przedmiotu. Zamieszczono opis konstrukcji dwóch typów przetworników określonych jako rurkowy (6 wariantów) pozwalających przeprowadzić badania dla różnych objętości materiału roboczego i jednakowej długości wyjściowej oraz stałej objętości przy różnych średnicach materiału roboczego. Autor rozprawy zaprojektował i wykonał stosowne stanowiska badawcze do pomiaru siły i przemieszczenia przetworników wraz z układem grzewczym wymuszającym zmianę objętości kompozytu. W dalszej części praca zawiera wyniki badań przetworników w reżimie pracy polegającym na nagraniu

kompozytu do temperatury 75°C a następnie schłodzeniu w wolnym powietrzu. Przedstawiono bezwzględne i względne zmiany długości oraz tak zwane naprężenie blokujące, które wykorzystano do porównania sił generowanych przez przetwornik. Autor wskazał konieczność modyfikacji modelu obliczeniowego zmiany długości kompozytu o uwzględnienie dodatkowych sił tarcia pojawiających się na ściankach przetworników rurkowych wskutek ekspansji kompozytu. Przedstawiono to zależnością (12) na str. 41 i potwierdzono zgodność równania z wynikami eksperymentu (Rys. 30, str. 42). Na tym etapie zaproponowano modyfikację metody grzania kompozytu poprzez dostarczanie ciepła z zewnątrz za pomocą nagrzewania indukcyjnego zamiast zatapiania w materiale spirali grzewczej, co uprościło przygotowanie elementu roboczego z kompozytu silikon-etanol.

Procedura badawcza została powtórzona dla przygotowanych przetworników mieszkowych. Ich konstrukcja została zaproponowana przez doktoranta jako remedium na pewne niedogodności w pracy przetworników mieszkowych, jak np. zwiększanie siły tarcia kompozytu o ścianki rurki podczas zwiększania objętości co skutkowało zmniejszeniem zakresu ruchu czy wręcz zatrzymaniem siłownika. Określono parametry pracy przetworników oraz wyznaczono ich charakterystyki.

Niezwykle ważnym aspektem pracy wszelkiego rodzaju napędów jest ich trwałość i niezawodność w dłuższym czasie pracy przy wielokrotnym powtarzaniu cyklu pracy – w tym przypadku proces grzania i chłodzenia i wynikające z tego zmiany sił i przemieszczeń. Badania uzupełniono testami 100 cykli faz grzania i chłodzenia, gdzie doktorant wykazał bardziej stabilną pracę siłowników mieszkowych.

Ostatni podrozdział oznaczony jako 3.6 zawiera zaproponowany w pracy opis matematyczny zjawisk zachodzących w przetworniku mieszkowym będący podstawą algorytmu projektowania przetwornika dla zadanych wartości uzyskiwanych sił i przemieszczeń. Zaproponowany algorytm obliczeniowy znajduje się na końcu rozdziału na str. 61-62.

Rozdział 4 zawiera zbudowany przez doktoranta model numeryczny z wykorzystaniem wcześniej określonego modelu matematycznego. Model numeryczny wykonano w środowisku Matlab-SIMULINK. Autor wykazał jego poprawność porównując wyniki symulacji numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych.

W rozdziale 5 doktorant przedstawił koncepcję układu sterowania pracą zaprojektowanych przetworników prezentując i analizując pracę w układzie zamkniętym z regulacją typu P, PI i regulatorem kaskadowym. Zaprojektowano kolejne stanowisko do badań pracy przetwornika w układzie regulacji ze sprzężeniem zwrotnym i wspomaganie procesu chłodzenia kompozytu z wykorzystaniem wentylatorów. Badania potwierdziły możliwość skutecznego kontrolowania pracy napędu o takiej konstrukcji z zastosowaniem regulacji PI, która dała najlepsze rezultaty. Należy wskazać, że błąd pozycjonowania był niewielki i w większości przypadków poniżej 0,1 mm. Autor rozprawy szukając poprawy możliwości kontrolowania pracy przetwornika zaproponował reżim pracy z forsowaniem napięcia, gdzie układ sterowania zwiększa moc grzania kompozytu w fazie początkowej i przełącza na niższą moc gdy układ zbliża się do wartości zadanej, co pozwoliło na skrócenie czasu ustalania nawet do 5 razy. Wszystkie analizy pracy układu sterowania poparto stosownymi schematami układów oraz licznymi wykresami z wynikami badań.

Podsumowania pracy i wnioski doktorant przedstawił w Rozdziale 6. Podsumowano treść pracy opisując najważniejsze jej etapy i obserwacje wpływające na podejmowane działania w kolejnych fazach pracy. Wnioski wskazują na wykonanie w ramach pracy zadań konstrukcyjnych przetworników, określeniu charakterystyk ich pracy, zbudowanie modelu matematycznego i algorytmu projektowania przetworników. Zaproponowano kilka rozwiązań algorytmów sterowania pracą siłowników w zamkniętym układzie regulacji. W ramach pracy zweryfikowano eksperymentalnie poprawność przyjętych rozwiązań. Cel pracy został osiągnięty. Na zakończenie doktorant wskazał na perspektywy dalszych badań.

Na stronach 96-99 zamieszczono spis literatury.

### 3. Ocena osiągnięcia

Rozprawa doktorska pt. „Konstrukcja i sterowanie przetwornika zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol” opracowana przez mgra inż. Tomasza Kapłona dotyczy aktualnych problemów projektowania i sterowania układów napędowych z przetwornikami opartymi na kompozytach z materiałami zmiennofazowymi. Głównym obszarem zainteresowania doktoranta były zagadnienia konstrukcji przetworników oraz określenie ich właściwości i funkcjonalności w celu sformułowania algorytmów sterowania stosownych dla tego typu urządzeń.

W dużej części praca ma charakter badawczy, eksperymentalny, gdzie główną zaletą w tym przypadku są walory poznawcze. Zważywszy, że doktorant zaprojektował i wykonał elementy robocze w postaci siłowników liniowych, zaplanował i przeprowadził szerokie spektrum badań wykorzystując własne konstrukcje stanowisk badawczych, wyniki tej pracy same w sobie już stanowią dużą wartość. Doktorant wykazał wysoki poziom wiedzy i umiejętności przy planowaniu i wykonaniu eksperymentów wykorzystując przy tym stosowne do problematyki pracy urządzenia i aparaturę badawczą. Prezentacja wyników badań i analiza cechuje się dużą szczegółowością i właściwie dobraną formą prezentacji. Wyniki badań i analiz są opisane szczegółowo wraz z obserwacjami i bieżącymi wnioskami, co pozwalało na poprawne kierunkowanie dalszych prac.

Ważnym aspektem podnoszącym wartość pracy jest podjęcie opracowania modelu matematycznego. Na bazie podstawowych zależności opisujących zjawiska zachodzące podczas przemiany fazowej etanolu w materiale kompozytu doktorant, opierając się na wynikach badań i konstrukcji przetwornika mieszkowego, zaproponował wzory wiążące geometrię przetwornika i podstawowe parametry pracy jak siła i przemieszczenie członu roboczego uzależniając je od zmian temperatury kompozytu. Model zweryfikowano wynikami badań i w efekcie końcowym doktorant zaproponował algorytm projektowania przetworników mieszkowych, co jest wartościowym efektem końcowym wprost do zastosowań przemysłowych dla inżynierów-konstruktorów. Dodatkowo model matematyczny został wykorzystany do budowy modelu numerycznego w środowisku Matlab/SIMULINK i przeprowadzenia dalszych symulacji pracy układu.

W rozprawie doktorskiej należy zwrócić uwagę na ważny aspekt zawarty w pracy, a w mojej ocenie mało zaakcentowany w celu i tezie pracy. Chodzi mianowicie o rozwiązanie zagadnienia sterowania pracą omawianych konstrukcji przetworników. Zawsze ważnym zadaniem podczas stosowania wszelkiego rodzaju napędów jest odpowiedź na pytanie czy możliwe jest i jak kontrolować warunki pracy napędu oraz jaka jest dynamika odpowiedzi układu na ewentualne zakłócenia. Zagadnienia regulacji położenia w układzie zamkniętym są w tym przypadku o tyle istotne, że rzeczywiście brak opracowań dotyczących tak konkretnych rozwiązań technicznych dla analizowanych konstrukcji. Doktorant poświęcił temu zagadnieniu znaczną część pracy bo aż 22 strony proponując kilka rozwiązań regulatorów i układów sterowania mających na celu między innymi przyspieszenie pracy napędu, np. układ sterowania z forsowaniem napięcia. Problematyka jest poparta badaniami i wnioskami wskazującymi możliwe zastosowania.

Oceniając rozwój i przygotowanie doktoranta do podjęcia problematyki zawartej w jego rozprawie doktorskiej należy uwzględnić 3 współautorskie pozycje w spisie literatury, gdzie możemy znaleźć pozycje indeksowane w Web of Science (WoS). Na dzień sporządzania recenzji w spisie WoS widnieją 4 pozycje (2 artykuły i 2 materiały konferencyjne), dla których indeks  $h=1$ . Doktorant wykazał bardzo duże umiejętności w przygotowaniu i prowadzeniu eksperymentów, gdzie dla nietypowych obiektów badań potrafił zaprojektować i wykonać niestandardową aparaturę badawczą, zaś wykonane badania cechują się rzetelnością w opracowaniu i prezentacji wyników.

#### 4. Uwagi szczegółowe i pytania do pracy

Analiza treści rozprawy doktorskiej nasuwa także pewne uwagi odnoszące się do poruszanych zagadnień i w związku z tym pojawiają się pytania i uwagi, czasem o charakterze dyskusyjnym:

1. Wątpliwość budzi sformułowanie celu i tezy pracy:
  - jak wskazano wcześniej w mojej ocenie cel szczegółowy nr 4 dotyczący układu regulacji powinien być silniej zaakcentowany i włączony do celu głównego,
  - teza szczegółowa brzmi „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”. Skąd na etapie definicji celu i tezy pracy doktorant był w stanie tak precyzyjnie określić parametry układu? Czy ta teza wynikała z konkretnego zapotrzebowania? Dlaczego tego nie wyjaśniono? Teza w zasadzie opisuje uzyskane rezultaty – uważam ją za zbyteczną.
2. W konstrukcji przetworników jako metodę grzania kompozytu wykorzystano spiralę grzejną zatopioną w materiale. Zmiana objętości kompozytu musi pociągać za sobą odkształcenia spirali grzejnej. Czy podczas badań obserwowano efekty odklejania się kompozytu od drutu grzałki? Doktorant nie wspomina też, że ewentualne rozciąganie spirali również wymaga poświęcenia nieco wypracowanej przez przetwornik siły. Czy rozważano te kwestię i czy ewentualnie możliwe jest oszacowanie tej straty?
3. Na stronie 68 akapit opisuje porównanie wyników symulacji i badań eksperymentalnych. Ocena za pomocą sformułowania „model dobrze odwzorowuje” nie ma tak dużej siły argumentacji jak podanie opisu ilościowego, np. błąd względny.
4. Pojawiają się zwroty potoczne, które nie zawsze dobrze wskazują na właściwy parametr, np. str. 70 u dołu „napęd działający w pętli zamkniętej” zamiast „napęd działający w zamkniętym układzie sterowania”; na str. 75 „czas dojścia do zadanej pozycji” zamiast „czas ustalania” lub „czas regulacji” czy też np. „czas osiągnięcia zadanej odległości” w opisach i nagłówkach w tabelach 12, 13 i 14. Dla analizowanych charakterystyk są zdefiniowane parametry o określonych nazwach.
5. Na rysunkach 95, 96 i 97 przedstawiono przebieg czasowy opisany jako „sygnał sterujący” który odpowiada sygnałowi  $v_2$  na rysunku 94 przedstawiającym układ regulacji z forsowaniem napięcia. Wartości tego sygnału osiągają do 3700 na rys. 97. Jest to sygnał sterujący, jaka jest interpretacja wzmacnienia  $K_{PT}$  na rys. 94 czy można określić jednostkę? Czy  $e_T$  jest uchybem temperatury?

#### 5. Uwagi redakcyjne

Ogólnie rozprawa doktorska jest dobrze opracowana pod względem redakcyjnym, jest staranna i czytelna. Treść rozprawy jest spójna i ułożona logicznie. Podział na części i rozdziały nie budzi zastrzeżeń. Rozprawa zawiera elementy oczekiwane w tego typu opracowaniach naukowych jak przegląd literatury, cel i zakres pracy, program badań, opis wykorzystanych materiałów i aparatury badawczej, prezentację i analizę wyników badań. Rysunki i opisy na nich są czytelne, informacje w tabelach proste w interpretacji.

W niektórych przypadkach podpisy pod rysunkami są zbyt obszerne i ta treść mogłaby zostać przesunięta do właściwej treści pracy. Kilka podpisów pod rysunkami jest podzielonych między stronami lub też rysunki podzielone są na 2 strony. Powtórzono numerację wzoru (12) na stronach 41 i 56. Doktorant nie ustrzegł się również drobnych błędów literowych i stylistycznych, są one jednak sporadycznie a wskazane uchybienia nie wpływają na zrozumienie treści pracy.

## **6. Podsumowanie i wniosek końcowy**

Przedstawioną rozprawę doktorską mgra inż. Tomasza Kapłona pt. „Konstrukcja i sterowanie przetwornika zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol” oceniam bardzo pozytywnie.

Praca dotyczy zagadnień projektowania i sterowania pracy przetworników liniowych bazujących na kompozycie zmiennofazowym silikon-etanol. W pracy zaprezentowano bardzo dobrze przygotowane badania eksperymentalne oraz rzetelnie je przedstawiono i przeanalizowano. Dokonano również matematycznego modelowania zjawisk zachodzących w obiekcie badań. Autor rozprawy rozpoznał i zdefiniował problem badawczy, wykazał się stosowną wiedzą i umiejętnościami planowania badań i przeprowadzenia eksperymentu. Analizę i wnioski przeprowadzono i sformułowano w sposób poprawny, adekwatny do zagadnienia.

Jako najważniejsze osiągnięcie należy uznać obszerny zakres badań przeprowadzonych przez doktoranta oraz umiejętne wykorzystanie ich wyników do modelowania i prowadzenia obliczeń symulacyjnych. Nie bez znaczenia pozostaje również zaproponowany i zweryfikowany w pracy układ sterowania pracą przetwornika mieszkowego.

Uważam, że zakres pracy został przez doktoranta wypełniony potwierdzając postawioną w pracy tezę przez co osiągnięto cel pracy.

**Mając na uwadze przedstawione w recenzji aspekty stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgra inż. Tomasza Kapłona 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 2017r., poz. 1789) i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Jednocześnie wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej.**

*Roland Pawliwdek*