

Szczecin 14.11.2022

Prof. dr hab. inż. Mirosław Pajor
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

Recenzja pracy doktorskiej pt. ” Modelowanie przekładni pasowej synchronicznej w kontekście automatycznej diagnostyki i optymalizacji działania ciągła z użyciem symulacji komputerowej” autorstwa mgr inż. Juliana Malaka.

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia RDIMe.512.11.2022 Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak z dnia 29.06.2022 r.

1. Przedstawienie treści pracy

Jednym z wymogów tzw. czwartej rewolucji przemysłowej „Przemysł 4.0” jest zastosowanie w procesach produkcyjnych „inteligentnych maszyn”. Inteligencja maszynowa może przejawiać się w wielu aspektach: zaawansowanej cyfrowej technologii sterowania, interaktywnych interfejsach komunikacyjnych człowiek-maszyna, automatycznej diagnostyce dynamicznych stanów maszyny. Automatyczna diagnostyka maszyn wymaga rozbudowy jej systemu sensorycznego, rejestrującego wybrane sygnały, w których zawarta jest (często w złożony niejawny sposób) informacja o aktualnym dynamicznym stanie maszyny i realizowanych przez nią procesach technologicznych. Zaawansowana diagnostyka jest bezpośrednio powiązana z technologią „big data” przetwarzania dużych zbiorów rejestrowanych danych oraz rozwojem nowych technologii analizy tych danych z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji „deep learning” i statystyki matematycznej. W procesach diagnostyki stanu maszyny często stosowane są ich modele cyfrowe i modele realizowanych przez nie procesów roboczych, popularnie dzisiaj nazywane cyfrowymi bliźniakami. Badania w tym obszarze są realizowane przez wiele ośrodków naukowych i dynamicznie się rozwijają.

Recenzowana rozprawa mieści się w tej nowoczesnej tematyce badawczej. Autor zajmuje się badaniami diagnostycznymi wybranych elementów systemów napędowych maszyn. Rozprawa koncentruje się na diagnozowaniu zębatach przekładni pasowych, które często stosowane są w napędach maszyn jako jeden z elementów przeniesienia napędu. W recenzowanej pracy Autor badał wpływ naciągu pasa na błąd synchronizacji oraz możliwość zastosowania sygnału o błędzie synchronizacji do diagnostyki tej przekładni. Autor analizował różnorodne techniki modelowania napięcia pasa pod kątem możliwości ich zastosowania do implementacji w systemie sterowania układu diagnostycznego. Ponadto zbudowano oryginalne stanowisko badawcze do doświadczalnej weryfikacji zaproponowanych metod sterowania naciąganiem pasa oraz diagnozowania wybranych parametrów funkcjonalnych przekładni. Przeprowadzono analizę wielu sygnałów diagnostycznych poprzez badania ich korelacji.

Opiniowana praca doktorska liczy 128 stron i składa się z pięciu rozdziałów i spisu ilustracji. Na końcu zamieszczono spis literatury zawierający zestaw 89 pozycji literaturowych. Dobór źródeł literaturowych jest poprawny ale dosyć skromny. W spisie literatury dużo jest pozycji bardzo luźno związanych z badanym przez Autora problemem naukowym. W rozprawie pojawiają się dwa rozdziały, w których analizowany jest stan zagadnienia – wkomponowane w rozdziały merytoryczne, jednak często zawierają one bardzo szerokie odwołania do źródeł (tzn. na raz cytowanych jest duża ilość pozycji – brak jest uszczegółowień). Kilkakrotnie zdarza się, że Autor powołuje się na literaturę nie cytując żadnej konkretnej pozycji. W rozprawie nie jest wystarczająco wyeksponowana teza pracy. Autor wspomina o tezie pracy w rozdziale 1.1, gdzie analizuje stan wiedzy, ale czytając ten rozdział bardzo łatwo to przeoczyć. Teza ta zakłada, że na podstawie błędu synchronizacji kół pasowych można określić czy w działaniu przekładni występują anomalie związane z nieprawidłowym poziomem parametrów takich jak: siła naciągu pasa, współczynnik sprężystości cięgna, siła obciążenia łożysk. Tak postawiona teza jest interesująca z punktu widzenia budowy układu diagnostyki pracy przekładni pasowej. Rozdział 1.2 zatytułowanym „Zakres badań” bardziej przypomina streszczenie pracy niż szczegółowy opis zamierzeń Autora.

Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej obejmują: wprowadzenie oraz trzy rozdziały merytoryczne zakończone wnioskami końcowymi. W pierwszym rozdziale rozprawy Autor zamieszcza wprowadzenie do problematyki poruszanej w rozprawie. Zaprezentowane zostają problemy wynikające z eksploatacji połączeń pasowych z

pasami zębatymi. Autor prezentuje różne błędy montażu przekładni, które wpływają na problemy eksploatacyjne. Następnie streszcza tematykę rozprawy.

W rozdziale drugim prezentowane jest stanowisko badawcze w postaci przekładni pasowej z pasem zębatym z układem automatycznego napinacza pasa. W układzie napinacza następuje pomiar sił napięcia pasa. Autor omawia procedurę pomiaru sił oraz sterowania napinaczem. Ponadto przeprowadza kalibrację układu napinającego i pomiaru sił.

W rozdziale trzecim Autor prezentuje różne techniki modelowania stanu obciążeń w elementach przekładni pasowej. W rozdziale zaprezentowano techniki modelowania, poczynając od metody MES (metody elementów skończonych), poprzez metodę SES (sztywnych elementów skończonych) i kończąc na uproszczonym modelu analitycznym. Jeden z podrozdziałów nazwany jest „obecny stan wiedzy problemy szczegółowe”. Jednak w tym rozdziale głównie cytowane są pozycje z obszaru technik modelowania dość luźno związane z tematem głównym rozprawy, którym jest diagnostyka stanu pracy przekładni. Brakuje mi natomiast szczegółowego omówienia literatury o tematyce typowo diagnostycznej. Nie jest do końca jasna idea tych obliczeń. Wydaje się, że już na starcie można się spodziewać, że modele MES i SES nie nadają się na algorytmy symulacji w czasie rzeczywistym w małym mikrokontrolerze. Nie mniej porównanie wyników symulacji różnymi metodami jest interesujące.

W rozdziale czwartym Autor rozszerzył opis stanowiska badawczego, opisując układ sensoryczny pomiaru położenia kąтового kół pasowych oraz układ pomiaru drgań węzłów łożyskowych. Ponadto zaprezentowano środowisko programistyczne do akwizycji danych oraz procedury wyznaczania wskaźników wykorzystywanych do badania korelacji pomiędzy analizowanymi zjawiskami. Następnie Autor prezentuje wyniki badań eksperymentalnych na zaprojektowanym stanowisku. W pierwszej kolejności analizuje zarejestrowane sygnały a następnie prezentuje wyniki korelacji poszczególnych zarejestrowanych symptomów. W ostatnim podrozdziale rozdziału czwartego Autor komentuje otrzymane wyniki badań.

Rozprawę zakończono podsumowaniem, w których Autor wyciąga wnioski dotyczące osiągniętych rezultatów pracy badawczej oraz nakreśla dalsze perspektywy kontynuacji poruszanej tematyki badawczej.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

Problematyka budowy układów diagnostycznych bazujących na bieżącym monitorowaniu wielu sygnałów w procesie eksploatacji, jest silnie rozwijającą się tematyką z dużym potencjałem rozwojowym. Pan Julian Malaka rozwija ten nurt badań w ramach swojej pracy doktorskiej. Autor sprawnie posługuje się nowoczesnymi narzędziami z zakresu komputerowego modelowania i symulacji cyfrowych złożonych problemów technicznych. Autor badania modelowe wspiera badaniami eksperymentalnymi. Projektuje stanowiska badawcze zarówno w warstwie mechanicznej jak i elektronicznej. Samodzielnie programuje automatykę stanowiska badawczego oraz procedury akwizycji i przetwarzania danych. Zaprojektowane stanowisko badawcze ma duży potencjał rozwojowy. Autor przeprowadził szereg badań eksperymentalnych wykazując przy tym dużą umiejętność prowadzenia takich badań. Zaplanowane zadania Autor zrealizował a uzyskane rezultaty poddał analizie.

Do największych oryginalnych osiągnięć tej pracy zaliczyć można:

1. Zaprojektowanie oryginalnego stanowiska do badań procesów diagnostyki zębatej przekładni pasowej na podstawie monitorowanych parametrów eksploatacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem błędów synchronizacji kół pasowych.
2. Wyniki badań eksperymentalnych poszukujących korelację pomiędzy sygnałami diagnostycznymi rejestrowanymi na zaprojektowanym stanowisku badawczym.

Pozytywnie oceniam oryginalność i innowacyjność wymienionych osiągnięć. Zarówno zbudowane stanowisko jak i sama tematyka poruszana w pracy ma ogromny potencjał badawczy, jednak Autor nie do końca potencjał ten wykorzystał. Zapoznając się z wynikami pracy oraz z wnioskami końcowymi, odnosi się wrażenie, że praca nie do końca została przemyślana i konsekwentnie zrealizowana.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Str.33 Autor pisze, że w „literaturze zidentyfikowano pewne nurty...” i nie powołuje się na konkretne pozycje. Analogicznie jest na str. 53 Autor pisze o nurtach modelowania zidentyfikowanych w literaturze i nie podaje konkretnych cytowań. Podobnie na str. 69

pojawia się tekst „Zostało to opisane w serii publikacji naukowych.” bez podania jakichkolwiek odniesień literaturowych. Dalej na str. 70 Autor pisze „Kolejny czynnik wpływający na ruchy cięgna, który jest akcentowany w literaturze...” i tutaj również brak jest konkretnych odwołań do literatury. Takich uchybień pojawia się w pracy wiele. Sam przegląd literatury nie jest wystarczająco pogłębiony. W pracy pojawiają się dwa rozdziały, w których analizowano stan zagadnienia tj.: rozdział 1.1. oraz rozdział 3.1. Jednak w pierwszym z tych rozdziałów Autor prezentuje wybrane błędy występujące w montażu przekładni pasowych (wiedza poradnikowa) i trudno nazwać to pogłębioną analizą literatury. Natomiast w rozdziale 3.1 Autor głównie skupia się na literaturze związanej z technikami modelowania obiektów mechanicznych metodami MES, SES, hybrydowymi. Jest to jednak temat poboczny w odniesienia do postawionej tezy pracy, która akcentuje budowę układu diagnostyki przekładni pasowej. Teza pracy natomiast nie do końca współgra z tytułem rozprawy, który bardziej akcentuje techniki modelowania. Jednak w części opisującej modelowanie przekładni pasowej (rozd.3) nie doszukuję się znaczących osiągnięć naukowych. Autor porównał kilka znanych metod symulacyjnych pomiędzy sobą (brak porównań z eksperymentem czyni, że nadal nie wiemy, która z nich jest dokładniejsza). Na koniec rozdziału Autor wyciągnął wnioski, że w układzie diagnostycznym można jedynie zaimplementować uproszczoną metodę modelowania analitycznego, co wydaje się dość oczywiste, bowiem trudno oczekiwać, że na zwykłym mikrokontrolerze uda się w efektywny sposób zaimplementować modele MES czy nawet SES. Zdecydowanie większą wartość naukową ma część pracy poświęcona budowie stanowiska badawczego i poszukiwaniu symptomów diagnostycznych w rejestrowanych na stanowisku sygnałach (zgodna z postawioną tezą pracy). W tym obszarze brakuje jednak pogłębionej analizy literaturowej. Reasumując, odnosi się wrażeni, że Autor nie do końca przemyślał układ pracy i nie mógł się zdecydować, w którą stronę praca ta ma być bardziej zorientowana.

2. Str.69, w rozdziale 4 (najważniejszym rozdziale pracy) Autor podaje, że największy wpływ na błąd synchroniczny pasa ma jego interferencja z kołami zębatymi (brak tutaj szczegółowych cytowań). Zamieszczono wprawdzie cytowanie literaturowe, ale wskazuje ono na cały blok dziesięciu pozycji literaturowych. Dalej Autor podaje, że będzie dodatkowo, oprócz czynników rozpoznanych w literaturze, analizował wpływ naciągu pasa. Następnie opisywane są szczegóły stanowiska badawczego i algorytmy przetwarzania danych. Po tym następuje przejście do prezentacji wyników pomiarów i

badania korelacji. Z uwagi na to, że jest to rozdział pracy najważniejszy, z punktu widzenia wartości naukowej, zaprezentowany opis eksperymentów jest niewystarczający. Autor nie przedstawił w planie eksperymentu jakie to czynniki literaturowe uwzględnia w eksperymencie, a jakie nie. Czy wspomniane w tym miejscu rozosiowanie kół pasowych (jako jeden z czynników literaturowych) jest uwzględniane w eksperymencie, czy nie? Można się jedynie domyślać, że oprócz owych czynników literaturowych Autor dodaje napięcie pasa oraz drgania wynikające z wprowadzonego niewyważenia. Brak bardziej szczegółowego opisu utrudnia zrozumienie toku rozumowania jakim się kieruje Autor realizując badania eksperymentalne.

3. Bardzo dyskusyjne jest wprowadzenie drgań. Autor wprowadza do układu napędowego dodatkowy krążek, który zmieni bezwładność napędu. Z pewnością odbije się to na wszystkich procesach przejściowych drgań skrętnych napędu. Ponadto wprowadzane jest niewyważenie, które raczej na drgania skrętne (synchronizację osi przekładni pasowej) bezpośrednio nie ma wpływu, ale może mieć poważny, niekontrolowany wpływ na drgania całej konstrukcji, a te z kolei na drgania pasa, napinacza itd., a tym samym pośrednio na błąd synchronizacji. Patrząc na rys.4.2 odnosi się wrażenie, że konstrukcja jest dość wiotka. Czujniki drgań na podporach łożyskowych (rys.4.1) będą przesyłały informację nie tylko o drganiach osi napędu ale również o drganiach całej konstrukcji. Czy Autor analizował do jakich sprzężeń drganiowych układu konstrukcja-pas-napinacz-sterowanie napinaczem (sterowanie nie uwzględnia drgań) może dochodzić po wprowadzeniu niewyważenia. Wydaje się, że oddziaływanie niewyważenia może istotnie zakłócić pozostałe symptomy jak napięcie pasa, synchronizacja czy te tzw. czynniki literaturowe (za mało opisane).
4. Na str.81 Autor zamieszcza w tabeli 12 dane z pomiaru drgań. Jak należy interpretować te dane? Z opisu stanowiska wynika bowiem, że do pomiaru drgań zastosowano akcelerometry, zatem mierzono przyspieszenia. Jak zatem rozumieć nagłówek tabeli 12 „Częstotliwość”?
5. Na str.88 ÷ 90 na rys. 4.15 ÷ 4.17 porównano przebiegi prędkości kół napędowego i odbiorczego w układzie bezwzględny co czyni te rysunki mało czytelne i stawia pod znakiem zapytania potrzebę ich publikacji. Myślę, że zdecydowanie lepiej prezentują się różnice prędkości tych kół.
6. Bardzo zaskakujące są wyniki prezentowane na wykresach 4.9, 4.10 i 4.11. Wykresy te nie bardzo do siebie pasują. Rys. 4.9 dla prędkości 15 obr/min jest zupełnie inny od

dwóch pozostałych. Natomiast w rys.4.10 (w porównaniu z rys.4.11) odnosi się wrażenie że zamieniono (b) i (e) z (a) i (d). Czy Autor może to jakoś wytłumaczyć?

7. Czy Autor może wyjaśnić co się dzieje z korelacją pomiędzy prędkościami kół przekładni pasowej przy prędkości 15 obr/min (str.94, rys.4.21) ?
8. Na rys.4.24 ÷ 4.26 przedstawiono wykresy widmowe drgań prędkości. Z jakich drgań liczone jest to widmo i w jaki sposób (dlaczego z wartości skutecznej sygnału – to istotnie zakłóci relacje częstotliwościowe)? Na stanowisku mierzono przecież przyspieszenia na podporach, zatem skąd tutaj wzięły się prędkości? Czy widmo to płynie w czasie (czy stosowano jakieś okno czasowe do ich wyliczenia) ? Co z tych wykresów wynika i jaką informację diagnostyczną one niosą?
9. Zadziwiająco są wnioski zamieszczone na końcu pracy. Autor dość patetycznie stwierdza, że dba o „napęd świata” i że „opracowane i przebadane eksperymentalnie koncepcje możliwe są do zastosowania we współczesnych systemach produkcyjnych...”. Tymczasem postawiona teza pracy nie została udowodniona. Oczywiście wynik negatywny nie deprecjonuje pracy i może być interesujący z naukowego punktu widzenia. Jednak wypada to odpowiednio skomentować. Autor we wnioskach nawet nie próbował wyjaśnić dlaczego nie udało się uchwycić żadnych sensownych korelacji obserwowanych symptomów ze zmianami synchronizacji prędkości wałów przekładni pasowej, a jest to bardzo interesujący i ważny wniosek z przeprowadzonych badań. Zdziwienie moje potęguje fakt, że Autor na stronie 69 wspomina o możliwościach potencjalnego zagrożenia wystąpienia takiego stanu, cytuję „... jeśli rozpoznany jest model ukazujący relację pomiędzy napięciem pasa i błędem synchronizacji, to inne zjawiska dynamiczne mogą tę relację zaburzyć...”. Dalej Autor wskazuje, że drgania są kolejnym czynnikiem, który jest potencjalnym źródłem zaburzeń w działaniu procedur diagnostycznych opartych na śledzeniu błędu synchronizacji przekładni. Odnoszę wrażenie, że Autor ma świadomość tych zjawisk – tylko dlaczego te problemy nie zostały przedyskutowane we wnioskach końcowych?

Tekst pracy został zredagowany na dobrym poziomie i właściwie zilustrowany rysunkami i wykresami. W trakcie czytania pracy wykryłem następujące błędy redakcyjne:

- Str. 13, ostatni akapit. Jest „wdrażaniA”, winno być „wdrażania”.
- Str. 42, cała strona jest pusta – błędne formatowanie układu tekstu.
- Str. 59, pierwszy akapit. Jest „w współpracy”, winno być „we współpracy”.

- Str. 63, drugi akapit. Jest „Wyniki uzyskane w wyniku...”, winno być np. „Wyniki uzyskana w symulacji...”.
- Str. 66, ostatni akapit. Jest „Rysunek 3.25...”, winno być „Rysunek 3.28...”.
- Str. 70, koniec drugiego akapitu. Jest „obytek”, winno być „ubytek”.
- Str. 76. Rys. 4.6 i 4.7, widoki okien edycyjnych i dialogowych nie wnoszą nic interesującego do pracy.
- Str. 83, pierwszy akapit. Niekompletne zdanie.
- Str. 83, pierwszy akapit podpunkt 1. Jest „ $a \div b$ ”, winno być „ $a \div c$ ”. Ten sam błąd jest na kolejnych stronach od 94 do 102.
- Str.87 rys.4.14 i str. 91 rys.4.18, źle dobrane skale na osi rzędnych.
- Str.97 ÷ 99, rys. 4.24 ÷ 4.26, źle ustawione grubości słupków i ustawienie pod złym kątem sprawiają, że rysunki te są mało czytelne.
- Str. 114, drugi akapit. Jest „dogotowaniem protokołów komunikacyjnych...”, winno być „dostosowaniem protokołów komunikacyjnych...”.

4. Podsumowanie

Podsumowując powyższą recenzję należy stwierdzić, że Autor nie ustrzegł się błędów, które **niepotrzebnie** obniżają ocenę niniejszej pracy. Problematyka poruszana w rozprawie jest bowiem bardzo interesująca i ma duży potencjał badawczy. Projektowanie i badania układów automatycznej diagnostyki maszyn jest istotnym kierunkiem badań naukowych. Autor uzyskał negatywny wynik poszukiwań korelacji pomiędzy obserwowanymi symptomami a sygnałem diagnostycznym, jakim jest błąd synchronizacji przekładni. Zatem teza pracy nie została potwierdzona. Jednakże fakt uzyskania negatywnego wyniku w stosunku do oczekiwań nie umniejsza pracy naukowej. Taki stan rzeczy może być interesujący z naukowego punktu widzenia, ponieważ wskazuje na potencjalne problemy do rozwiązania w kolejnych etapach badań danego zjawiska. Wymaga to jednak wnikliwej analizy i wyciągnięcia właściwych wniosków podsumowujących uzyskane wyniki. Tego w pracy mi zabrakło i liczę na to, że podczas publicznej obrony Autor tę lukę uzupełni. Autor projektując stanowisko badawcze, wykonując symulacje numeryczne a następnie rozbudowane badania doświadczalne wykazał dużą biegłość w projektowaniu, modelowaniu, programowaniu i planowaniu badań doświadczalnych. Wysoko oceniam warsztat badawczy Doktoranta.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że w ocenie całościowej praca ta spełnia na poziomie dostatecznym wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z zm.). Zrealizowana przez mgr. inż. Juliana Malaka praca stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego, pomimo, że wynik jest negatywny, i wnosi istotny wkład w dyscyplinę inżynieria mechaniczna. Ponadto wskazuje na zadowalający poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej jej Autora. **Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.**

