

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia..... 17. 01. 2023
Zarejestrowano pod nr
Podpis *dm*

Gliwice, 13.01.2023r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. **Mateusza Zabaryłło** pt.

**Metoda zautomatyzowanego wykrywania uszkodzeń dużych maszyn wirnikowych
z wykorzystaniem danych ze stanów przejściowych**

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. **Tomasz Barszcz**

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. **Mariusz Banaszekiewicz**

1. Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem opracowano na podstawie zlecenia z dn. 21 listopada 2022 roku Pana dra hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH, Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, działającego na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dn. 3 listopada 2022 roku.

Rozprawa została napisana w języku angielskim ze streszczeniem w języku polskim i angielskim. Praca liczy 155 stron, składa się z 9. rozdziałów i zawiera wykaz bibliograficzny liczący 63 pozycje, wykaz rysunków (64) oraz wykaz tabel (35).

Rozprawa doktorska dotyczy metody oraz systemu detekcji i identyfikacji wybranych uszkodzeń turbosespołów energetycznych.

Praca została przeze mnie rozpatrywana jako osiągnięcie w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (poprzednio Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika). Warto podkreślić, że praca doktorska ma charakter praktyczny, a jej wynik jest również efektem długoletniej pracy zawodowej Autora.

2. Uwagi o sformułowanym problemie

Złożoność współczesnych środków technicznych, od których wymaga się optymalnej wydajności przy jednoczesnym zachowaniu maksymalnego bezpieczeństwa pracy, czyni problematykę diagnostyki procesów technicznych jednym z najistotniejszych kierunków rozwoju badań nowoczesnej automatyki i robotyki. Ważnym aspektem eksploatacji obiektów technicznych ze względu na czynniki zagrożenia ludzkiego życia oraz skażenia środowiska jest zagadnienie bezpieczeństwa. Można podać wiele obszarów współzależności człowieka i środka technicznego, gdzie bezpieczeństwo odgrywa kluczową rolę, takich jak przemysł lotniczy, kosmiczny, motoryzacyjny, chemiczny czy też energetyczny. W przypadku mega-układów technicznych tj. maszyny krytyczne w przemyśle energetycznym, zagadnienie diagnostyki on-line/off-line jest przedmiotem wielu interesujących prac badawczych i rozwojowych prowadzonych w kraju i na świecie. Co więcej w dobie czwartej rewolucji przemysłowej systemy diagnostyczne, wspierające podejmowanie decyzji przez personel utrzymania ruchu, postrzegane są jako niezbędne uzupełnienie systemów monitorowania obiektów krytycznych. Powoduje to, że badania naukowe ukierunkowane są na rozwój metod diagnostyki wspartej modelowo oraz diagnostyki symptomowej. Szczególnie ważny problem badawczy dotyczy pozyskiwania wiedzy diagnostycznej umożliwiającej budowę zautomatyzowanych systemów detekcji, izolacji i identyfikacji uszkodzeń. Można zauważyć, że w ostatnich latach wiedza diagnostyczna coraz częściej pozyskiwana jest z baz danych pomiarowych w sposób zautomatyzowany m.in. z zastosowaniem metod uczenia maszynowego, gdzie bardzo często stosowane są metody i techniki sztucznej inteligencji. Mając na uwadze różne ograniczenia metod uczenia maszynowego, w tym częsty problem jakości zbioru danych uczących należy zauważyć, że ciągle bardzo ważną rolę odgrywają metody diagnozowania, w których wiedza diagnostyczna pozyskiwana jest od ekspertów dziedzinowych lub przy ich udziale. Należy również podkreślić znaczenie hybrydowych metod eksploracji danych będących połączeniem różnych podejść.

Recenzowana praca mieści się w omówionym powyżej obszarze badawczym. Autor zaproponował oryginalną metodę zautomatyzowanego wykrawania i identyfikacji wybranych uszkodzeń dużych maszyn wirnikowych z zastosowaniem danych ze stanów przejściowych. Ponadto Autor opracował innowacyjny system detekcji i identyfikacji wybranych uszkodzeń turbozespołów wielkiej mocy, który może być wykorzystany przez personel utrzymania ruchu jako wspomagające narzędzie diagnostyczne. Mając na uwadze obecny stan wiedzy i techniki w tym zakresie należy uznać, że problem badawczy sformułowany przez Autora jest niezmiernie ważny i aktualny, a tematyka pracy ma duże znaczenie naukowo-poznawcze i aplikacyjne.

3. Treść rozprawy

Rozprawa doktorska złożona jest z 9. rozdziałów oraz bibliografii liczącej 63 pozycje. Praca zawiera streszczenia w j. pol. i j. ang. oraz wykaz rysunków, tabel i skrótów.

Rozdział 1 rozpoczyna się od krótkiego opisu klasy obiektu diagnozowania będącego przedmiotem rozprawy. Autor skrupulatnie przeprowadza dyskusję pokazującą ważną rolę turbozespołów wielkiej mocy w bilansie produkcji energii elektrycznej w Polsce i na świecie. Podkreśla istotę wczesnego wykrywania uszkodzeń maszyn krytycznych tego typu w celu przeciwdziałania nieplanowanym przestojom, a przede wszystkim poważnym awariom, które mogą mieć katastroficzne skutki. W tej części rozdziału Doktorant przedstawił bogatą w ilustracje charakterystykę obiektu badań, omówił typową jednostkę energetyczną wykorzystywaną w naszym kraju - turbozespół 13K215 o mocy 230 MW. Autor zwrócił również uwagę na zmienne warunki operacyjne oraz ciągły charakter pracy obiektu w długich przedziałach czasu bez konieczności wybiegu i rozbiegu turbozespołu. Podał różne przykłady dotyczące zagadnienia eksploatacji turbozespołów, w tym działań związanych z prowadzeniem bieżących i planowanych prac modernizacyjnych oraz remontowych. Ten rozdział dotyczy również podstaw pomiaru drgań maszyn wirnikowych. Autor omówił zasadę działania czujników przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń drgań, pokazał ich typowe aplikacje w systemach monitorowania. Szczególną uwagę zwrócił na zasady diagnozowania w oparciu o pomiar drgań względnych wirnika z zastosowaniem czujników wiropędowych. W rozprawie jako podstawę teoretyczną do badań diagnostycznych przyjęto model Jeffcotta dynamiki wirnika z wymuszeniem synchronicznym. Doktorant model ten wykorzystał m.in. do symulacji i wyjaśnienia symptomów niewyrównoważenia obserwowanych podczas stanów przejściowych. W dalszej części rozdziału Doktorant przytacza inne znane z literatury modele dynamiki wirnika oraz modele jego uszkodzeń jednocześnie definiując najważniejsze niesprawności dużych maszyn wirnikowych tj. niewyrównoważenie, niewspółosiowość, przycieranie wirnika, niestabilność hydrodynamiczna łożysk, przeciążenie/niedociążenie łożysk. Następnie przechodzi do głębszej analizy literatury na temat diagnozowania maszyn wirnikowych wskazując genezę i cel pracy. Podkreśla niewielką liczbę prac badawczych poświęconą metodom diagnozowania turbozespołów wielkiej mocy bazującym na danych ze stanów przejściowych oraz przytacza przykłady ograniczeń jakie dostrzega w przypadku analizy zbiorów danych, zgromadzonych podczas stanów przejściowych, z zastosowaniem metod uczenia maszynowego, w tym metod sztucznej inteligencji. Oceniam, że trafnie formułuje problem badawczy i cel rozprawy, wskazując jednocześnie oczekiwany rezultat i zakres pracy.

Rozdział 2 dotyczy uszczegółowionego opisu obiektu diagnozowania oraz przenośnego systemu pomiarowego użytego przez Autora podczas prowadzenia badań. W pierwszej części rozdziału Doktorant przedstawił dwa schematy poglądowe turbogeneratorów będących przedmiotem rozważań, opisał ich typowe warunki operacyjne podczas eksploatacji oraz uzasadnił wybór obiektu diagnozowania. Bardzo wartościowy fragment rozdziału dotyczy analizy przykładowych wykresów przebiegów amplitud drgań względnych zarejestrowanych podczas wybiegu i rozruchu turbogeneratorsa. Autor zauważa, że bardzo często systemy monitorowania wyliczają jedynie proste cechy rejestrowanych sygnałów, które są podstawą elementarnych decyzji np. bazując na ocenie progów decyzyjnych. Zdaniem Autora rozprawy w ten sposób pomijanych jest wiele wartościowych informacji diagnostycznych, które mogą być zastosowane w celu określenia stanu technicznego maszyny. Zauważa również lukę technologiczną polegającą na braku systemów automatycznej detekcji i identyfikacji uszkodzeń, bazujących na analizie danych gromadzonych podczas rozruchu i wybiegu, które mogą mieć zastosowanie do diagnostyki on-line (rozszerzenie funkcjonalności systemów monitorowania) lub off-line (wsparcie dla ekspertów dziedzinowych). W drugiej części rozdziału Autor opisał również specyfikę przenośnych systemów pomiarowych umożliwiających gromadzenie danych ze stanów przejściowych.

Rozdział 3 opisuje proces gromadzenia i przetwarzania danych ze stanów przejściowych. Doktorant przedstawił przenośny system pomiarowy użyty przez niego podczas prac badawczych do gromadzenia danych ze stanów przejściowych. Szczegółowo omówił konfigurację systemu pomiarowego oraz pokazał przykłady wskazując w jaki sposób uzyskał cechy rejestrowanych sygnałów drganiowych. Bardzo ważną część rozdziału stanowią podrozdziały dotyczące zaproponowanej struktury danych pomiarowych oraz metoda interpolacji, co pozwoliło Autorowi na rozwiązanie problemów jakie występują podczas rejestracji sygnałów w procesie wybiegu i rozruchu turbozespołów wielkiej mocy. Doktorant opisał metodę interpolacji funkcjami sklejanymi trzeciego stopnia (ang. cubic spline interpolation) oraz uzasadnił w jaki sposób wyznaczył optymalny interwał pomiędzy prędkościami obrotowymi wirnika umożliwiający automatyzację analiz danych rejestrowanych podczas stanów przejściowych.

Rozdział 4 rozpoczyna zasadniczą część rozprawy i dotyczy zaproponowanej metody detekcji wybranych uszkodzeń dużych maszyn wirnikowych z wykorzystaniem danych ze stanów przejściowych. Na wstępie rozdziału Autor dokonuje krytycznej analizy stanu wiedzy w zakresie metod detekcji anomalii, głównie pod kątem ich zastosowania do diagnozowania maszyn wirnikowych. Ten szczegółowy przegląd literatury utwierdza Autora w przekonaniu o słuszności sformułowanego problemu badawczego polegającego na potrzebie opracowania nowej metody detekcji anomalii, która pozwoli na wsparcie działań eksploatacyjnych realizowanych przez personel utrzymania ruchu podczas rozruchu i wybiegu turbiny. Zaproponowaną metodę nazwał OpEn -

Operating Envelope zaznaczając, że wzorował się na koncepcji metody diagnozowania bazującej na obwiedni widma, przy czym w celu uniknięcia nieporozumień, Autor podkreślił różnice w obu podejściach. Doktorant przedstawił schemat blokowy metody detekcji uszkodzeń wyjaśniając szczegółowo poszczególne kroki jakie należy wykonać aby uzyskać końcowy wynik. Kluczowym elementem metody wydaje się być sposób selekcji pomiarów ze stanów przejściowych stanowiących podstawę wyznaczenia wzorcowego przebiegu wybranej cechy sygnału (np. amplitudy przemieszczeń drgań względnych dla jednego z węzłów łożyskowych) podczas rozbiegu/wybiegu maszyny. Jako źródło danych Autor podaje bazy danych pomiarów historycznych oraz dane pozyskane z działu projektowego. Równie istotny w tym miejscu jest wybór sposobu określenia przebiegu krzywych wartości granicznych (górnej i dolnej). Ponadto, Doktorant zaproponował cztery metryki oceniające nowy przebieg wybranej cechy sygnału względem przebiegu referencyjnego z uwzględnieniem krzywych wartości granicznych. Należy również zaznaczyć, że Autor opracował drugi warianty tej metody, przypadek 3D. W tym wariacie przebieg wzorcowy budowany jest bazując na dwóch cechach sygnału, amplitudzie drgań oraz przesunięciu fazowym, natomiast obszar poprawnego działania maszyny określany jest za pomocą elipsy. Również w tym wariacie Autor zaproponował metrykę, bazującą na najkrótszej odległości od elipsy, oceniającą nowy przebieg wybranej pary cech sygnału względem przebiegu referencyjnego.

Rozdział 5 można traktować jako kontynuację zasadniczej części pracy bowiem zawiera opis dotyczący metody identyfikacji wybranego uszkodzenia. Podobnie jak poprzednio na wstępie rozdziału Autor dokonuje krytycznej analizy stanu wiedzy, w tym w zakresie metod klasyfikujących stan techniczny maszyn wirnikowych, szczególnie z wykorzystaniem danych ze stanów ustalonych. W tej części rozdziału przedstawia również szczegóły dotyczące metod dekompozycji sygnałów jako obiecującego kierunku badań w ekstrakcji cech wrażliwych na rozpatrywane uszkodzenie. Doktorant bazując na wybranej i rozwiniętej przez niego metodzie dekompozycji sygnałów niestacjonarnych zaproponował metodę identyfikacji wybranego uszkodzenia turbozespołów wielkiej mocy. Bazując na wieloletnim doświadczeniu zawodowym i mając na uwadze wyniki własnych prac badawczych zaproponował trzy scenariusze umożliwiające identyfikację wybranego uszkodzenia. Do wyznaczenia wartości parametrów odpowiednio zmodyfikowanych dekomponowanych funkcji bazowych dla zaproponowanego zbioru scenariuszy użył algorytmu ewolucji różnicowej wywodzącego się z rodziny algorytmów genetycznych.

Rozdział 6 to kontynuacja głównej części pracy. Autor w tej części zaproponował koncepcję architektury systemu zautomatyzowanej detekcji i identyfikacji uszkodzeń dedykowanego do diagnozowania dużych maszyn wirnikowych z wykorzystaniem danych ze stanów przejściowych. Bardzo skrupulatnie opisał biblioteki zaimplementowanych algorytmów działających wg zaproponowanych przez niego metod OpEn i MD3. Czytelny opis głównych algorytmów przedstawił z wykorzystaniem pseudokodu, natomiast szczegółowy opis najważniejszych procedur zamieścił

w postaci listingów funkcji i skryptów zaimplementowanych z wykorzystaniem języka Python oraz platformy Google Colab. Ta część pracy ma szczególnie wartościowy charakter z praktycznego punktu widzenia.

Rozdział 7 przedstawia wyniki walidacji metody detekcji wybranych uszkodzeń z wykorzystaniem danych ze stanów przejściowych dużych maszyn wirnikowych (w tym turbozespołów o mocy powyżej 200 i 560 MW). Wariant metody OpEn 2D został zweryfikowany z wykorzystaniem cech sygnałów drgań względnych rejestrowanych za pomocą par czujników zlokalizowanych w siedmiu węzłach łożyskowych. Dane pomiarowe były gromadzone podczas testów diagnostycznych turbogeneratorów zlokalizowanych w różnych elektrowniach. Doktorant przedstawił przykładowe tabele zawierające wyniki pomiarów umożliwiające wyznaczenie wzorcowych przebiegów amplitudy przemieszczeń drgań względnych. Poprawność działania metody OpEn 2D wykazał dla czujnika drgań względnych 1X węzła łożyskowego nr 1 biorąc pod uwagę wybieg i rozruch maszyny. Z spośród dziesięciu eksperymentów, sześć zbiorów danych reprezentujących stany przejściowe zostało wybrane do wyliczenia wzorcowego przebiegu (stan pełnej zdatności), natomiast cztery pozostałe zbiory reprezentowały niesprawność w postaci niewspółosiowości spowodowanej niepoprawnym ułożeniem stopni HP-IP. Wartości graniczne zostały wyznaczone zgodnie z opisem przedstawionym w rozdziale 4. Autor wyznaczył również metryki oceniające wszystkie przebiegi wybranej cechy sygnału względem przebiegu referencyjnego ze stanu przejściowego U2_09. Pozwoliło to na wyznaczenie trendu wartości RMSE względem kolejnych prób osiowania wału i umożliwiło wyznaczenie wartości granicznej metryki RMSE dla określonego czujnika i uszkodzenia. Wariant metody OpEn 3D został zweryfikowany z wykorzystaniem cech sygnałów drgań względnych (amplitud przemieszczeń drgań i przesunięcia fazowego) rejestrowanych za pomocą par czujników zlokalizowanych w węzłach łożyskowych nr 8 i 9 jednostki o mocy 560 MW (przyjęta numeracja 6X, 6Y, 7X, 7Y). Działanie metody 3D pokazano dla przypadku uszkodzenia polegającego na niewyrównoważeniu. Dodatkowo przeprowadzono analizę porównawczą obrazującą zmiany najkrótszej odległości do elipsy dla kolejnych stanów przejściowych (przed i po procesie wyważania).

Rozdział 8 to kontynuacja badań weryfikacyjnych. Rozdział przedstawia wyniki walidacji metody identyfikacji wybranego uszkodzenia z wykorzystaniem danych ze stanów przejściowych pozyskanych na zbudowanym stanowisku laboratoryjnym oraz z rzeczywistego obiektu (w tym turbozespołu o mocy powyżej 560 MW). Pierwsza część rozdziału poświęcona jest czynnym eksperymentom diagnostycznym z użyciem stanowiska w celu wykazania poprawności działania metody dla przypadku scenariusza z co najmniej jednym zakresem prędkości krytycznych oraz niesprawności w postaci niewyrównoważenia. Druga część rozdziału przedstawia wyniki testów z użyciem cech sygnałów drgań względnych (amplitud przemieszczeń drgań i przesunięcia fazowego)

rejestrowanych za pomocą par czujników zlokalizowanych w węzłach łożyskowych nr 8 i 9 jednostki o mocy 560 MW.

Rozdział 9 zawiera podsumowanie rozprawy doktorskiej. Autor omówił w nim spostrzeżenia jakie nasunęły się w wyniku realizacji pracy doktorskiej, opisał swój oryginalny wkład w rozwój metod przetwarzania sygnałów, metod detekcji i identyfikacji uszkodzeń oraz zarysował plan dalszych badań.

Rozprawę uzupełnia spis literatury, rysunków i tabel, wykaz skrótów, oraz streszczenia w językach polskim i angielskim.

4. Oryginalne osiągnięcia rozprawy

Bardzo ważnym atutem pracy doktorskiej Pana Mateusza Zabaryłło jest przemysłowy charakter prezentowanych wyników badań. Autor sprawnie posługuje się metodami i narzędziami przetwarzania sygnałów, eksploracji danych oraz optymalizacji. Silne ukierunkowanie wdrożeniowe podwyższa poziom implementacyjny pracy. Do najważniejszych osiągnięć pracy należy zaliczyć:

- opracowanie oryginalnej metody detekcji wybranych uszkodzeń dużych maszyn wirnikowych z wykorzystaniem danych ze stanów przejściowych (wariant OpEn 2D i 3D), w tym
 - zaproponowanie sposobu selekcji pomiarów ze stanów przejściowych stanowiących podstawę wyznaczenia wzorcowego przebiegu wybranej cechy sygnału;
 - zaproponowanie sposobu wyznaczania przebiegu krzywych wartości granicznych (górną i dolną) dla wariantu 2D oraz parametrów elipsy dla wariantu 3D;
 - zaproponowanie metryk oceniających nowy przebieg wybranej cechy lub cech sygnału względem przebiegu referencyjnego;
- opracowanie oryginalnej metody identyfikacji wybranego uszkodzenia dużych maszyn wirnikowych z wykorzystaniem danych ze stanów przejściowych (MD3), w tym
 - zdefiniowanie reprezentacji algebraicznych zmodyfikowanych dekomponowanych funkcji bazowych oraz powiązanie parametrów tych funkcji z wybranym uszkodzeniem;
 - zastosowanie algorytmu ewolucji różnicowej wywodzącego się z rodziny algorytmów genetycznych do strojenia wartości parametrów funkcji bazowych;
- implementacja algorytmów działających wg opracowanych metod;
- zaproponowanie i rozwój architektury systemu zautomatyzowanej detekcji i identyfikacji wybranych uszkodzeń, bazującego na algorytmach OpEn 2d/3D i MD3, dedykowanego do diagnozowania dużych maszyn wirnikowych z wykorzystaniem danych ze stanów przejściowych;

- implementacja systemu zautomatyzowanej detekcji i identyfikacji wybranych uszkodzeń z wykorzystaniem języka Python oraz platformy Google Colab;
- przygotowanie stanowiska laboratoryjnego umożliwiającego przeprowadzenie czynnych eksperymentów diagnostycznych;
- przeprowadzenie badań weryfikacyjnych pokazujących działanie opracowanych metod z użyciem danych pozyskanych w warunkach laboratoryjnych oraz z rzeczywistych obiektów;
- publikacja częściowych wyników badań w renomowanych czasopismach, co pozwala na zrozumienie toku rozumowania Autora w dochodzeniu do końcowego rozwiązania.

Wysoko oceniam poziom praktyczny pracy, w tym opracowanego rozwiązania w postaci bibliotek algorytmów w języku Python, stanowiących ważną część zaproponowanego systemu diagnostycznego.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Tytuł rozprawy w języku polskim i angielskim nie są zgodne. Ponadto, tytuł sugeruje, że Autor opracował jedynie metodę detekcji uszkodzeń dużych maszyn wirnikowych z wykorzystaniem danych ze stanów przejściowych.
2. Cel pracy podany w streszczeniu i w podrozdziale 1.4.2 nie są w pełni zgodne, a także Autor używa naprzemiennie określeń algorytm, metoda lub system detekcji i identyfikacji uszkodzeń powodując, że trudno zorientować się co dokładnie w danej części pracy ma na myśli. Na przykład na str. 60 zapisano zdanie „Fault detection is the first step of the set of algorithms” lub na str. 78 zdanie “The first part of the FDI algorithms is the fault detection method”.
3. Podrozdział 3.5.2 jest kontynuacją części teoretycznej na temat metody interpolacji i zawiera wyniki badań mających na celu wyznaczenie optymalnego interwału pomiędzy prędkościami obrotowymi wirnika umożliwiającą automatyzację analiz danych rejestrowanych podczas stanów przejściowych. Wydaje się zasadne aby podrozdział ten zawarty był w dalszej części pracy przedstawiającej wyniki badań, tym bardziej, że do oceny uzyskanego rezultatu pokazanego na Rys. 32 niezbędne jest zapoznanie się z opisami metody OpEn z kolejnego rozdziału.

4. Selekcja pomiarów ze stanów przejściowych stanowiących podstawę wyznaczenia wzorcowego przebiegu wybranej cechy sygnału jest istotnym krokiem metod OpEn 2D/3D. W rozdziale 4.2 Autor wspomina o danych ze stanów przejściowych pozyskanych z rzeczywistych obiektów oraz danych dotyczących konstrukcji turbiny pozyskanych z działu firmy gdzie pracuje. Dane pomiarowe zostały szczegółowo opisane w pracy, natomiast drugie źródło wiedzy nie występuje w sposób jawny i trudno ocenić jakie ma to znaczenie dla pracy. Ponadto, w podrozdziale 4.3 przedstawiono opis sposobu wyboru danych ze stanów przejściowych będących podstawą dalszych obliczeń. Autor opisuje pięć kategorii na jakie następuje podział całego zbioru danych. Brak jest jednak wyjaśnienia jakie kryteria zostały zastosowane aby przyporządkować określone dane pomiarowe do wyznaczonych kategorii, szczególnie istotne są kryteria pozwalające na utworzenie podzbioru „dynamic condition: correct – helpful in the research” umożliwiającego wyznaczenie referencyjnych wzorców wszystkich rozpatrywanych cech sygnałów dla stanu pełnej zdatności.
5. Ustalenie wartości granicznych jest kolejnym bardzo istotnym elementem metod OpEn 2D i 3D. W podrozdziale 4.5 Doktorant ustala wartości graniczne dolną i górną (oraz max. amplitudę i max. fazę dla przypadku 3D) powołując się na swoje doświadczenie wsparte sugestiami pracowników GE. To rodzi kilka pytań i wątpliwości. Na przykład:
- jak ustalać wartości graniczne w przypadku nowej bazy danych dla innej serii maszyn?
 - czy wartości przyjęte w tym podrozdziale są poprawne dla innych czujników rozpatrywanych w tej pracy?
 - skoro do wyznaczenia wzorcowego „baseline” użyto średniej arytmetycznej to dlaczego w przypadku określenia wartości granicznych nie skorzystano z metod statystycznych (np. reguły trzech sigm) i przyjęto stałe wartości progów dla każdej z rozpatrywanych prędkości obrotowych?
- Doktorant powinien pokusić się o sformułowanie ogólnych reguł jakimi się kierował, które pozwoliłyby zrozumieć sposób jego postępowania, a co więcej ułatwiłyby zastosować metodę w nowych przypadkach.
6. W podrozdziale 5.5 Doktorant zaproponował zastosowanie algorytmu ewolucji różnicowej wywodzącego się z rodziny algorytmów genetycznych do strojenia wartości parametrów funkcji bazowych. W opisie algorytmu posługuje się na przemian określeniem funkcja kosztu lub funkcja celu, jednocześnie podając w podsumowaniu pracy jako wkład własny, że Autor zdefiniował funkcję przystosowania. Proszę o wyjaśnienie czy pojęcia te używane są jako synonimy oraz proszę o wskazanie fragmentu pracy, w którym definiowany jest sposób wyliczenia funkcji przystosowania.

7. Autor przedstawił argumenty jakie używane są zazwyczaj podczas wyboru algorytmu DE do rozwiązania problemu minimalizacji funkcji. Są one poprawne ale czy mają pełne przełożenie na problem, który rozwiązywał? Mając na uwadze zastosowane dekomponowane funkcje (27-30) oraz przyjmując jako kryterium dopasowania np. sumę kwadratów różnic (ang. Sum Squared Error) można uznać, że wyznaczenie gradientu lub/i wyższych pochodnych nie jest zadaniem bardzo skomplikowanym i otwiera drogę do zastosowania również innych być może bardziej adekwatnych metod optymalizacji.
8. Weryfikacja metody OpEn 2D opisana w podrozdziale 7.2 była przeprowadzona wyłącznie dla jednego wybranego czujnika dla przypadku niewspółosiowości. Brak jest podstaw do tego aby sądzić, że metoda OpEn 2D działa również dla pozostałych czujników, a co więcej dla innych uszkodzeń, które zostały wyszczególnione w podrozdziale 1.4.1 podczas formułowania problemu badawczego. Nie jest również jasne dlaczego Autor nie przedstawił na Rys. 51 i 52 przebiegu wzorcowego „baseline” wyznaczonego za pomocą średniej arytmetycznej tak jak to jest sugerowane w podrozdziale 4.3 oraz powstaje pytanie dlaczego referencyjnym przebiegiem był ten oznaczony jako U2_09.
9. Jak sugeruje Autor weryfikacja metody OpEn 3D przedstawiona w podrozdziale 7.3 była realizowana dla różnych uszkodzeń. Szczegółowe wyniki jakie przedstawia dotyczą jednak czterech wybranych czujników oraz przypadku niewyrównoważenia. Stąd rodzą się podobne pytania jak w poprzedniej uwadze.
10. Nie jest zrozumiałe dlaczego Autor w rozdziale 8 przedstawia wyniki identyfikacji stanu zdatności. Zgodnie ze schematem pokazanym na Rys. 43, identyfikacja uszkodzenia realizowana jest po jego wykryciu za pomocą OpEn, dlatego rodzi się pytanie po co identyfikować stan zdatny?
11. W kontekście oceny zaproponowanej metody i zbudowanego systemu detekcji i identyfikacji uszkodzeń w pracy brak jest wyników testów przedstawiających wskaźniki ilościowe. Oceniając bowiem metody/systemy detekcji uszkodzeń bardzo często bierzemy pod uwagę różne wskaźniki np. wskaźnik prawidłowych diagnoz, wskaźnik fałszywych diagnoz itd. Biorąc pod uwagę wyniki testów przedstawione w pracy doktorskiej z całą pewnością można stwierdzić, że metoda oraz zbudowany system detekcji i identyfikacji wybranych uszkodzeń działa poprawnie, ale trudno jest ocenić sprawność/dokładność.

12. W podsumowaniu zabrakło odniesienia do podrozdziału 1.4.1 i próby znalezienia odpowiedzi na pytanie, które ze wskazanych najczęstszych niesprawności można diagnozować za pomocą zaproponowanego podejścia i jakie muszą być spełnione warunki i ograniczenia.

Recenzowana praca od strony redakcyjnej nie budzi większych zastrzeżeń. Rysunki na ogół są czytelne i dobrze ilustrują treść pracy. Rozprawa jest starannie przygotowana, przy czym zdarzają się błędy natury językowej i pominięcia, poniżej wymienię tylko niektóre:

- Błędne odnośniki do rysunków i tabel np. str. 26 – Fig. 4, str. 66 – Fig. 1, str. 69 – Fig. 5, str. 87 – Fig. 8, str. 135 – Fig. 4 i 5, str. 136 – Fig. 6, str. 141 – Tab. 8
- Błędne odnośniki do wzorów np. str. 58 – (6), str. 84 – (2), (3-5)
- Brak opisu osi (górny wykres) i nieczytelne legendy na Rys. 40 na str. 75
- Czerwona czcionka w numeracji podrozdziału – str. 75
- Błędny odnośnik do rozdziału 12 – str. 134
- Niezgodność oznaczeń w Tab. 1 i na Rys. 16, a_2 i a_p oraz błędne użycie ‘Unit’ – str. 134
- Wiele ze skrótów i oznaczeń użytych w pracy nie zostały zamieszczone na liście przedstawionej na str. 4, na liście również zdarzają się błędy np. dwukrotne wyjaśnienie skrótu ML, brak konsekwencji w indeksowaniu oznaczeń w pracy i na liście (t_1 , t_2 , D_S , ...), dziwne oznaczenia r i f_i – str. 73, brak wyjaśnień wszystkich oznaczeń a także brak ujednoczenia niektórych oznaczeń (używanie M lub m i K lub k) na Rys. 13 i w równaniach (2-7)
- Sporo drobnych błędów językowych np. str. 28 – ‘Figure 14 presents the solution ... presents the solution...’, str. 31 – ‘... Vance et al. [6], who presents ...’, str. 32 – ‘Brito et al. in [12] ... He used ...’, str. 37 – ‘... and one generator Figure 17 ...’, str. 44 – ‘Figure 23 and Figure 24 presents ...’, str. 56 – ‘CS interpolate ...’, ‘Schumaker [24] and Dyer [25] presents ...’, str. 57 – ‘... and Wheatley in [26] describes ...’, str. 60 – ‘... data over-hung ... data ...’, ‘Zhang et al. ... He proposed ... his work ...’ itd.
- Zdanie ‘Unfortunately, there is a lack ...’ na str. 79 przedstawione w rozdziale na temat przeglądu metod identyfikacji dotyczy metody detekcji uszkodzeń.
- Wzór (18) pozwalający na wyznaczenie wskaźnika kurtozy na str. 69 w obecnej postaci dotyczy skupienia poszczególnych obserwacji wokół średniej. W jaki sposób zatem Autor użył go jako metryki do wyznaczenia odległości pomiędzy dwoma wektorami.
- Jako miarę dopasowania funkcji aproksymującej (24) Autor zaproponował wskaźniki MSE lub MAE (rozdział 5), natomiast ocena wyników identyfikacji była realizowana z użyciem RMSE i MSE (rozdział 8), dlaczego?

5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgra inż. Mateusza Zabaryłto poświęcona metodzie zautomatyzowanego wykrywania i identyfikacji wybranych uszkodzeń dużych maszyn wirnikowych z wykorzystaniem danych ze stanów przejściowych stanowi osiągnięcie Autora i wnosi cenny wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (poprzednio Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika). Przedstawione przeze mnie uwagi, niekiedy krytyczne lub dyskusyjne, w niczym nie dyskwalifikują pracy i jej pozytywnej oceny.

Po zapoznaniu się z rozprawą stwierdzam, że Autor wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (poprzednio Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika), trafnie sformułował problem naukowy i następnie przedstawił jego oryginalne rozwiązanie. **W ocenie całościowej praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z zm.).** Zrealizowana przez Pana mgra inż. Mateusza Zabaryłto praca stanowi autorskie rozwiązanie sformułowanego problemu projektowo-badawczego i wnosi interesujący przykład zastosowania systemów detekcji i identyfikacji wybranych uszkodzeń turbozespołów wielkiej mocy. Ponadto zrealizowane prace projektowo-badawcze wskazują na wysoki poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej jej Autora.

Podsumowując niniejszą recenzję rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Mateusza Zabaryłto wykonanej pod opieką promotora Pana prof. dra hab. inż. Tomasza Barszcza i promotora pomocniczego Pana dra hab. inż. Mariusza Banaszkiwicza **wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie o dopuszczenie Pana mgra inż. Mateusza Zabaryłto do publicznej obrony.**



Dr hab. inż. Piotr Przyszałka, Prof. PŚ