RDIMe.512.7.2023

dr hab. inż. Jędrzej Mączak, prof. ucz.

Zakład Ciągników i Napędów Hydraulicznych
Instytut Pojazdów i Maszyn Roboczych
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych
Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 84
02-524 Warszawa
jedrzej.maczak@pw.edu.pl

Warszawa, 17.06.2023 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
BIBLIOTEKA
w Gliwicach

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Kalischa pt.

Metoda detekcji uszkodzeń w diagnostyce procesów z uwzględnieniem kontekstu

przygotowanej pod kierunkiem naukowym promotora
dr hab. inż. Anny Timofiejczuk, prof. P.Ś.

1. Wprowadzenie

Recenzję wykonano na podstawie pisma RDIMe.512.7.2023 prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak, Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, z dnia 29.03.2023 roku.

2. Uwagi o sformułowanym zadaniu

Recenzowana praca dotyczy nader aktualnej problematyki detekcji uszkodzeń w diagnostyce procesów przemysłowych, prowadzonej z wykorzystaniem systemów doradczych wspomagających decyzję o prawidłowości procesu. Praca ma swoją genezę w realizacji projektu DISESOR prowadzonego m.in. w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w której Autor rozprawy brał aktywny udział, potwierdzony publikacjami. Projekt DISESOR dotyczył opracowania szkieletowego systemu wspomagania podejmowania decyzji dla systemów monitorowania procesów, urządzeń i zagrożeń w górnictwie.

Istnieją dwa typowe podejścia do diagnozowania obiektów technicznych i procesów przemysłowych: diagnostyka wsparta modelowo oraz diagnostyka symptomowa. W przypadku pierwszego podejścia tworzone są modele matematyczne obiektów odwzorowujące działanie obiektu lub procesu, a następnie w procesie diagnozowania porównywane są odpowiedzi modelu i rzeczywistego obiektu i tworzone tzw. residua. Ocena

Biuro Dziekana
wpłynęło dnia 20.06.2023
RDIMei.1171.512.2023
nr ..... zał. .....

stanu technicznego jest dokonywana poprzez ocenę wielkości tych residuów, czyli odstępstw od stanu założonego. W przypadku diagnostyki symptomowej ocena działania obiektu (poprawności procesu) jest dokonywana poprzez analizę zarejestrowanych sygnałów diagnostycznych i ich porównanie z wartościami oczekiwanymi. Metody diagnostyczne opracowane przez autora należą do tej drugiej grupy metod. Mogą one stanowić podstawę do budowy systemów eksperckich wspomagających proces diagnozowania poprawności przebiegu procesów przemysłowych.

W swojej rozprawie doktorskiej Autor skupił się na problemie opracowania metody wykrywania nieprawidłowości przebiegu procesu przemysłowego uwzględniającej jego kontekst, t.j. aktualny stan w jakim aktualnie znajduje się proces. Takie podejście do problemu wykrywania nieprawidłowości działania pozwala na zdecydowane uproszczenie procesu wnioskowania diagnostycznego poprzez ograniczenie ilości niezbędnych metod diagnostycznych (klasyfikatorów) potrzebnych do postawienia poprawnej diagnozy. Podejście takie, m.in. w diagnostyce maszyn jest oczywiste i powszechnie stosowane (np. stosowanie różnych metod diagnostycznych podczas analizy stanów niestacjonarnych i stacjonarnych maszyn wirnikowych czy też różnych sposobów pracy maszyn). Takie podejście jest rzadziej stosowane w diagnostyce procesów przemysłowych. Zaletą recenzowanej pracy jest skupienie się na samym zjawisku kontekstu procesu przemysłowego, jego wpływu na złożoność stosowanych klasyfikatorów oraz usystematyzowanie wiedzy w zakresie diagnostyki uszkodzeń procesów i tworzenia klasyfikatorów wspomaganych kontekstowo.

Głównym celem rozprawy było opracowanie i weryfikacja eksperymentalna na stanowisku badawczym metody detekcji uszkodzeń obiektów realizujących proces przemysłowy bazującej na klasyfikatorach kontekstowych, których parametry są automatycznie dostrajane za pomocą algorytmu optymalizacji wielokryterialnej. Zastosowanie algorytmu optymalizacji wpływającego na proces uczenia klasyfikatorów pozwoliło na określenie optymalnego zbioru parametrów. Wykorzystanie aktualnego kontekstu w jakim znajduje się proces oraz przeprowadzenie optymalizacji tworzonych klasyfikatorów pozwoliło na ograniczenie ich złożoności przyspieszając zarazem proces ich tworzenia.

Celami pracy, które postawił sobie Autor były:

- sformułowanie podstaw teoretycznych metody detekcji uszkodzeń z zastosowaniem cech kontekstowych,

- zdefiniowanie problemu optymalizacji wielokryterialnej z uwzględnieniem kryteriów bazujących na macierzy pomyłek dla zadania detekcji uszkodzeń,
- zaplanowanie i wykonanie czynnych eksperymentów diagnostycznych mających na celu zgromadzenie danych uczących oraz przeprowadzenie walidacji zaproponowanej metody.

Teza pracy nie została jednoznacznie określona, jednakże problem badawczy oraz cel rozprawy zostały jasno opisane w Rozdziale 1.1 pracy.

Mając na uwadze obecny stan wiedzy w tym zakresie należy uznać, że cele rozprawy sformułowane przez Autora są poprawne, a tematyka pracy ma duże znaczenie naukowo–poznawcze i aplikacyjne.

3. Charakterystyka pracy

Opiniowana praca, składająca się z sześciu rozdziałów, załącznika z wynikami eksperymentów, spisu literatury oraz wykazu oznaczeń i skrótów, zajmuje 151 stron. Wykaz literatury, obejmujący 111 pozycji, należy uznać za trafny. Wśród cytowanych pozycji jest 7 publikacji sygnowanych przez Autora związanych w całości z tematem pracy co należy uznać nader pozytywne. Bibliografia została pogrupowana alfabetycznie według pierwszego autora, jednakże Autor zastosował konwencję *imię – nazwisko* co utrudnia wyszukiwanie autorów publikacji. Dyskusyjne jest użycie języka angielskiego w bibliografii (np. słowo *and* przy publikacjach wieloautorskich, czy słowo *pages* przy określaniu numerów stron) co czasami prowadzi do dziwnych skojarzeń tekstu (np. … *volume 140 of Zeszyty. Politechnika Śląska*). Bibliografia powinna być raczej umieszczona przed załącznikiem A z wynikami eksperymentów nie zaś na samym końcu pracy.

Układ treści, w tym podział na rozdziały oraz strona graficzna rozprawy nie budzą zastrzeżeń. Rysunki i diagramy zostały, z dużą starannością, w zdecydowanej większości wykonane przez Autora. Praca została starannie sprawdzona pod względem edytorskim aczkolwiek zawiera niewielką ilość błędów edytorskich i stylistvcznych.

4. Ogólna ocena rozprawy

W opiniowanej rozprawie przedstawiono proces tworzenia metod wnioskowania diagnostycznego dla obiektów technicznych, głównie procesów przemysłowych. Zagadnienia podjęte w pracy zostały przedstawione w sześciu rozdziałach.

Autor ograniczył część wstępną pracy (Rozdział 1) do absolutnie niezbędnego minimum skupiając się w nim głównie na przedstawieniu problemu badawczego i celu

rozprawy. Wydaje się, iż było to słuszne założenie, gdyż poszczególne rozdziały dotyczące kolejnych tematów pracy zawierają osobne do nich wprowadzenia głęboko osadzone w literaturze związanej z tematyką poszczególnych rozdziałów.

Obszerny Rozdział 2 dotyczy wybranych zagadnień diagnostyki procesów przemysłowych. Omówiono w nim pojęcia podstawowe takie jak obiekt diagnozowania, pojęcia sygnału, jego cechy oraz pojęcie sygnału diagnostycznego. W rozdziale tym zdefiniowano również ogólnie tytułowe pojęcie kontekstu. Kontekst, w znaczeniu inżynierskim, należy rozumieć jako określoną wiedzę, pozwalającą na prowadzenie procesu wnioskowania w oparciu o pewne fragmenty wiedzy przez niego zdefiniowane. W dalszej części rozdziału omówiono pojęcia diagnostyki wspartej modelami oraz diagnostyki symptomowej oraz zdefiniowano zadanie klasyfikacji stanu technicznego obiektu. Omówienie zadania klasyfikacji stanowi wprowadzenie do opisu pojęcia klasyfikatora bazowego stanu technicznego. Autor opisał najczęściej stosowane klasyfikatory takie jak:

- k – Najbliższych sąsiadów,
- metryki Euklidesa, Manhattan i Czebyszewa,
- naiwny klasyfikator bayesowski,
- drzewa decyzyjne,
- sieć perceptronu wielowarstwowego.

W dalszej części rozdziału autor omówił systemy wieloklasyfikatorowe oraz przedstawił metody oceny klasyfikatorów. Zdefiniował pojęcia najczęściej używanych miar klasyfikatorów: dokładności, czułości i swoistości oraz pojęcia wskaźnika fałszywie pozytywnych i fałszywie negatywnych wyników klasyfikacji. Rozdział 2 kończy się wprowadzeniem do problemu optymalizacji w diagnostyce oraz podsumowaniem.

W Rozdziale 3 Autor skupił się na pojęciu kontekstu rozpoczynając od jego definicji słownikowej i przykładów użycia. Zdefiniował kontekst jako część wiedzy, która nie jest używana wprost do znalezienia rozwiązania, ale wpływa na wybór wiedzy bezpośrednio związanej z rozpatrywanym problemem. Jest zatem częścią wiedzy, która pozwala na wybranie pewnego fragmentu wiedzy połączonej z danym kontekstem. Oprócz definicji kontekstu Autor wprowadził pojęcie cechy kontekstowej *ck*, która stanowi reprezentację kontekstu oraz cechy podstawowej *cp*, która definiuje przynależność próbki danych zarejestrowanych w procesie do określonej klasy oraz cechy podstawowej kontekstowo zależnej. Końcowa część rozdziału dotyczy użycia kontekstu w zadaniach klasyfikacji, w szczególności zastosowania kontekstu w uczeniu maszynowym ze szczególnym uwzględnieniem metod bazujących na systemach wieloklasyfikatorowych (np. tzw. komitety

klasyfikatorów). Zawiera ona dyskusję możliwych podejść do zagadnienia klasyfikacji danych pomiarowych w zależności od występującego kontekstu.

Rozdział 4, zatytułowany *Metoda detekcji uszkodzeń z zastosowaniem kontekstu* opisuje kolejno wszystkie elementy składowe metody wykrywania nieprawidłowości przebiegu procesu przemysłowego opracowanej przez Autora. Autorska metoda diagnozowania procesu wykorzystuje kontekst (fazę) w jakim w danej chwili znajduje się proces oraz komitety (zbiory) klasyfikatorów dopasowane do tego kontekstu. Kolejnymi etapami metody opisanymi w rozdziale są:

- pobieranie (akwizycja) danych procesowych,
- ekstrakcja cech z zebranych danych celem określenia zmiennych procesowych będących podstawą klasyfikacji poprawności stanu technicznego procesu,
- zadanie uczenia klasyfikatorów z wykorzystaniem selekcji cech i oceną poprawności klasyfikacji,
- fuzja klasyfikatorów uwzględniająca kontekst,
- optymalizacja wielokryterialna klasyfikatorów pozwalająca na uzyskanie najlepszych wyników klasyfikacji minimalizująca wskaźnik fałszywych alarmów, maksymalizująca wskaźnik alarmów prawdziwych i maksymalizująca powtarzalność wyników.

Przebieg procesu diagnozowania (kolejne fazy opracowanej metody) pokazano na przykładzie prostego, symulowanego procesu składającego się z trzech faz (kontekstów) i dwóch zmiennych procesowych opisanych różnymi funkcjami matematycznymi. W pierwszym etapie przekształcono zbór przebiegów czasowych zmiennych procesowych na zbiór cech liczbowych zależnych od kontekstu. Następnie opisano proces realizacji zadania klasyfikacji polegającego na utworzeniu i wytrenowaniu klasyfikatora wykorzystującego metodę uczenia nadzorowanego na specjalnie przygotowanych i zidentyfikowanych zbiorach danych przypisanych do określonych stanów poprawności procesu. Proces wykorzystuje selekcję cech ze zbioru danych pomiarowych. Wynikiem tego zadania są zdefiniowane wcześniej miary czułości i swoistości określające „jakość" utworzonego klasyfikatora. Kolejnym etapem jest fuzja klasyfikatorów z wykorzystaniem kontekstu dokonywana na podstawie ich odpowiedzi w komitecie klasyfikatorów. Wybór właściwego klasyfikatora dokonywany jest na podstawie cechy kontekstowej opisującej aktualny stan przebiegu procesu. Ostatnimi etapami metody są: optymalizacja parametrów utworzonego klasyfikatora kontekstowego z wykorzystaniem funkcji kryterialnych: optymalizacja liczby cech podstawowych (zmiennych procesowych?) oraz optymalizacja parametrów klasyfikatorów. Optymalizację wykonano z użyciem algorytmu optymalizacji wielokryterialnej NSGA-II.

Rozdział 5 zawiera opis badań weryfikacyjnych wykonanych na hydraulicznym, laboratoryjnym stanowisku testowym FESTO S7 EduTrainer Compact Siemens S7-300 CPU313C pozwalającym na symulowanie procesów przemysłowych wykorzystujących ciecze. Autor zaprogramował na nim 9 stanów funkcjonalnych (kontekstów) procesu. Program badań przewidywał implementację 11 różnych, symulowanych uszkodzeń układu hydraulicznego takich jak: uszkodzone zawory, uszkodzone czujniki oraz nieszczelności w układzie hydraulicznym. Podczas weryfikacji opracowanej metody na stanowisku badawczym Autor wykonał ponad 220 eksperymentów stanowiskowych, co zajęło ok. 2 miesięcy pomiarów.

Do trenowania klasyfikatorów Autor opracował specjalne oprogramowanie w języku Java. Do uczenia maszynowego wykorzystał aplikację Open Source RapidMiner z wtyczkami opracowanymi przez siebie. W celu automatycznego doboru parametrów trenujących klasyfikatory w komitecie wykorzystał zestaw bibliotek pozwalających na optymalizację parametrów z wykorzystaniem algorytmu genetycznego MOEA Framework. Wynikiem działania metody jest zbiór rozwiązań optymalnych należących do frontu Pareto, z których ekspert-diagnosta może wybrać rozwiązanie optymalne ze względu na wybrane kryteria.

Po wyborze rozwiązań Pareto optymalnych (tj. takich, że każde inne rozwiązanie ma gorszą wartość przynajmniej jednej funkcji celu) Autor przeprowadził obszerną dyskusję jakości otrzymanych rozwiązań oraz przetestował działanie klasyfikatorów na tych samych danych, które były użyte do ich trenowania. Dodatkowo, rozwiązania wybrane jako optymalne zostały zwalidowane na odrębnych zbiorach danych pomiarowych.

Końcowa część rozdziału zawiera analizę otrzymanych wyników diagnozy w podziale na poszczególne uszkodzenia i dla różnych rozwiązań optymalnych klasyfikatorów. Uzyskany wskaźnik trafności poprawnych alarmów wynosił z reguły pomiędzy 75% i 90%, aczkolwiek dla niektórych stanów awaryjnych wynosił jedynie 31%. Należy tu zauważyć, że w dużej liczbie przypadków wskaźnik trafnych alarmów wynosił 100%. Należy uznać, że uzyskane wyniki klasyfikacji stanów są zadowalające co potwierdza skuteczność metody opracowanej przez Autora.

Rozdział 6 zawiera bardzo skrótowe podsumowanie pracy, wnioski końcowe i plan przyszłych badań. Należy zauważyć, że każdy z poprzednich rozdziałów zawiera na końcu podsumowanie zbierające w całość uzyskane wyniki i wynikające z nich wnioski. We wnioskach końcowych Autor potwierdza skuteczność klasyfikatora kontekstowego i uzyskanie lepszej diagnozy w stosunku do podstawowej metody klasyfikacji z jednoczesną znaczną redukcją złożoności klasyfikatora. Zwraca uwagę, że zastosowanie algorytmu optymalizacji wielokryterialnej daje możliwość wyboru spośród rozwiązań Pareto

optymalnych takiego rozwiązania, które najlepiej spełnia wymagania w zakresie detekcji uszkodzeń. Wnioski Autora należy uznać za trafne, aczkolwiek podsumowanie pracy mogłoby być bardziej wyczerpujące.

Obszerny załącznik A zawiera zbiorcze wyniki eksperymentu. Praca kończy się bibliografią i streszczeniami.

5. Uwagi szczegółowe i zapytania

Część uwag umieszczono już uprzednio w tekście, tu jednak zebrano je w całość:

1. Rozdział 1.2 (str. 4). *Rozdział czwarty zawiera opis metody detekcji stanu procesów przemysłowych.* Metoda odnosi się do detekcji nieprawidłowości procesu wynikającej np. z uszkodzenia armatury procesowej nie zaś detekcji stanu procesu. Stan bardziej należy rozumieć jako jego kontekst. Lepszym określeniem byłaby np. *metoda detekcji nieprawidłowości przebiegu procesu.*
2. Rozdział 2.4 (str. 28). W tekście błędnie podano, że suma wag *w* musi być równa 0, zaś w równaniu (2.23) podano 1.
3. Rozdział 2.5 (str. 29). *Diagnostyka procesów przemysłowych, jako jedna z gałęzi diagnostyki technicznej, zajmuje się detekcją i rozpoznawaniem zmian stanu procesów przemysłowych.* To sformułowanie jest błędne, a co najmniej nieprecyzyjne, gdyż wg. słownika PWN diagnostyka to określanie stanu technicznego urządzeń i ustalanie źródeł awarii.
4. Rozdział 3.1 (str. 34). W opisie cechy podstawowej użyto pojęcia zbioru *F*. Nie został on tu wyjaśniony, aczkolwiek w wykazie oznaczeń *F* jest określony jako zbiór klas / znanych uszkodzeń. Proszę wyjaśnić pojęcie zbioru *F* tu użytego.
5. Rozdział 4.1 (str. 49). W jaki sposób zdefiniowano *stan z uszkodzeniem* dla zmiennej procesowej zp_1 na Rys. 4.4 oraz w jaki sposób cecha kontekstowa z Rys. 4.3 „rozmnożyła" się z 3 do 6 kontekstów na Rys. 4.4 i 9 kontekstów na Rys. 4.5?
6. Rozdział 4.4 (str. 55). Zamiast odwołania do Rys. 4.4 powinno być odwołanie do Rys. 4.9.
7. Rozdział 4.4 (str. 59). Odwołanie do Rozdziału 4.2.1 mówi, że zostały w nim szerzej opisane metody bazujące na współczynniku korelacji między wartością cechy a etykietą klasy. W Rozdziale 4.2.1 (*Selekcja cech*) nic o tym nie wspomniano. Proszę o wyjaśnienie tego zagadnienia.
8. Rozdział 4.4 (str. 60). Proszę o wyjaśnienie pojęcia *chromosomu.* Nie zostało wcześniej zdefiniowane.

9. Rozdział 4.4 (str. 64). Zamiast odwołania do Rys. 4.6 powinno być odwołanie do Rys. 4.13.
10. Wydaje się, że Bibliografia powinna być umieszczona przed załącznikiem A. Jak już wspomniano wcześniej, dyskusyjne jest umieszczanie w bibliografii pełnych imion przed nazwiskami autorów. W kilku pozycjach brak jest informacji o wydawcy i rodzaju publikacji (podano jedynie autora(ów) i tytuł. Ponieważ praca jest pisana w języku polskim powinno się unikać angielskich pojęć (oprócz tytułów) takich jak *and*, *in*, *pages* itd.

Dodatkowe zapytania do Autora rozprawy:

Proszę bliżej wyjaśnić znaczenia pojęcia *komitet klasyfikatorów* wielokrotnie użyte w tekście pracy.

W Rozdziale 3 zdefiniowano pojęcia cechy podstawowej (cp) i cechy kontekstowo zależnej, zaś w Rozdziale 4 w opisie metody użyte jest pojęcie zmiennej procesowej (por Rys. 3.5 i Rys. 4.2). Proszę wyjaśnić tę rozbieżność.

6. Ocena rozprawy i wniosek końcowy

Oceniając całość przedstawionej rozprawy należy podkreślić istotną wagę poznawczą i techniczną głównego problemu pracy. Autor w głównej mierze skupił się nad opracowaniem metody klasyfikacji stanu technicznego procesu z wykorzystaniem kontekstu w jakim ten proces się aktualnie znajduje.

Zagadnienie zostało rozwiązane samodzielnie, a uzyskane rezultaty mogą być w części wykorzystane bezpośrednio w postaci rozwiązań aplikacyjnych, w części zaś stanowią przesłankę do dalszych badań metodycznych. Rozwiązując zadanie zakreślone w pracy, Autor wykazał się dobrą znajomością i wyczuciem problemów technicznych, rzetelną wiedzą w dziedzinie diagnostyki procesów przemysłowych, budowy klasyfikatorów ich stanu technicznego, optymalizacji, planowania eksperymentów oraz analizy sygnałów.

Pomimo przedstawionych przeze mnie uwag krytycznych, głównie dotyczących kwestii redakcyjnych nie zaś merytorycznych recenzowaną rozprawę doktorską Pana mgr. inż. Mateusza Kalischa pt. *Metoda detekcji uszkodzeń w diagnostyce procesów z uwzględnieniem kontekstu* oceniam bardzo pozytywnie.

Doktorant wykazał się dobrą znajomością problematyki prowadzenia badań literaturowych oraz eksperymentalnych, które umożliwiły opracowanie recenzowanej rozprawy doktorskiej. Oryginalność rozwiązania podjętego zagadnienia naukowego potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Kalischa ma znaczenie aplikacyjne, a uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w praktyce. Autor wykazał się także dobrym zrozumieniem problematyki odnoszącej się do przedmiotu prowadzonych badań. Biorąc pod uwagę całość pracy, a w szczególności jej wartość poznawczą i utylitarną oraz znaczący wkład własny uważam, że Doktorant rozwiązał istotny problem z zakresu dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna (Budowa i Eksploatacja Maszyn).

Dane bibliometryczne Autora uzyskane z Web of Science: 12 publikacji, 21 cytatów (17 bez autocytowań), H-index: 3.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, iż przedłożona rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Mateusza Kalischa pt. *Metoda detekcji uszkodzeń w diagnostyce procesów z uwzględnieniem kontekstu* spełnia wymogi obowiązujących przepisów w odniesieniu do prac doktorskich i może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna (Budowa i Eksploatacja Maszyn).

Niniejszą opinię przedkładam Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, zleceniodawcy tej recenzji.

Jędrzej Mączak

dr hab. inż. Jędrzej Mączak, prof. ucz.