

Prof. dr hab. inż. Dominik Sankowski
Instytut Informatyki Stosowanej
Politechnika Łódzka

Łódź, 07.11.2022 r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ PRZYGOTOWANA DLA RADY
DYSCYPLINY INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ**

Tytuł rozprawy:

***Zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej
w diagnostyce elementów maszyn CNC i wybranych
procesów technologicznych***

Autor rozprawy: mgr inż. Grzegorz Piecuch

Rozprawa została przygotowana pod merytoryczną opieką prof. dr hab. inż. Jacka Kluski oraz dr inż. Tomasza Żabińskiego, którym Rada Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Rzeszowskiej powierzyła funkcje promotora i promotora pomocniczego. Recenzję przygotowano na podstawie zlecenia przewodniczącego Rady Dyscypliny prof. dr hab. inż. Jacka Kluski, zawartego w piśmie z dnia 23 września 2022r.

DOBÓR TEMATU I ZAKRES ROZPRAWY

Celem współczesnych przedsiębiorstw jest maksymalizacja zysków przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej jakości wyrobów. Prawidłowe zarządzanie działu utrzymania ruchu opiera się na bezawaryjnym funkcjonowaniu maszyn i urządzeń eksploatowanych w danym przedsiębiorstwie. Jednym z najważniejszych elementów prawidłowego funkcjonowania i utrzymywania ruchu problem niezawodności. Potrzebę tę dostrzeżono w koncepcji Industry 4.0, w której jako podstawę funkcjonowania działu utrzymania ruchu wskazano działania predykcyjne. Jednym z fundamentów predykcyjnego utrzymania ruchu jest diagnostyka maszyn i procesów, mających na celu dostarczenie informacji na temat stanu technicznego eksploatowanych obiektów.

W PŁYNNIE
15. LIS. 2022



W przemyśle istnieje duże zapotrzebowanie na inteligentne systemy informatyczne w zastosowaniu do monitorowania, diagnozowania i kontroli wybranych procesów na przykład stopnia zużycia narzędzi. Od tego typu systemów wymaga się, aby na podstawie gromadzonych danych ostrzegały operatorów lub inżynierów procesu w czasie rzeczywistym o potencjalnej możliwości wystąpienia awarii bądź niezgodności jakościowej produktu. Zapobiega to powstawaniu nieprzewidzianych awarii i przestojów.

Recenzowana rozprawa odpowiada wyzwaniom współczesnych problemów związanych z wyżej wymienionymi zagadnieniami monitorowania i diagnozowania.

Tematyka rozprawy obejmuje opracowanie narzędzi informatycznych oraz architektury systemu diagnostycznego wykorzystującego metody inteligencji obliczeniowej.

Autor rozprawy za cel postawił sobie przeprowadzenie eksperymentów badawczych i zebranie danych pomiarowych dla wybranych procesów przemysłowych. Autor wybrał proces frezowania, który obejmuje pełen cykl życia kilkunastu narzędzi skrawających, a także wytłaczania jak i problemy niewyważenia układu napędowego. Statystycznie 80% awarii maszyn spowodowanych jest zniszczeniem łożysk.

Doktorant, na podstawie przeglądu literatury wskazuje na deficyt rozwiązań w postaci inteligentnych systemów nadzorowania zasobów lub procesów technologicznych pozwalających na zastąpienie doświadczonych operatorów maszyn lub inżynierów w wyżej wymienionych procesach.

Klasycznym podejściem umożliwiającym konstruowanie systemów predykcyjnych jest wykorzystanie modelu obiektu bądź procesu, na podstawie którego możliwe jest symulowanie stanów niekorzystnych i opracowywanie oraz testowanie metod pozwalających na ich wykrywanie i przewidywanie. Zakłady produkcyjne będące końcowym użytkownikiem maszyn, nie dysponują zazwyczaj ich modelami matematycznymi, co powoduje ograniczone możliwości zastosowania ww. podejścia w praktyce.

Autor rozprawy wykonując własne badania oraz eksperymenty przemysłowe jak i laboratoryjne zgromadził istotne w dalszej analizie dane pomiarowe. W tym celu Autor zaprojektował i wykonał własne stanowisko laboratoryjne służące analizie wibroakustycznej. Opracował i przeprowadził ocenę przydatności konwencjonalnych i zmodyfikowanych algorytmów klasyfikacji. Opracował oraz wykonał ocenę metod diagnozowania maszyn typu CNC.



MERYTORYCZNA OCENA ROZPRAWY

Przedstawiona do oceny rozprawa zawiera 179 stron tekstu podzielonych na 7 rozdziałów oraz 4 załączników zawierających: A) opis stanowisk badawczych; B) analizę doboru parametrów materiałów detali oraz procesów technologicznych C) dodatkowe informacje dotyczące prac zrealizowanych dla procesu frezowania; Załącznik D zawiera plan dalszych prac naukowych.

Ponadto rozprawa zawiera spis treści, streszczenie w języku angielskim, bibliografię, załączniki zawierające wykaz ważniejszych oznaczeń, wykaz rysunków i tabel.

Rozdział 1 stanowi wstęp, w którym Doktorant zawarł podstawowe informacje, cel i zakres pracy (rozdział 1.1), a także stan wiedzy (rozdział 1.2) w zakresie zastosowań metod inteligencji obliczeniowej w diagnostyce elementów maszyn sterowanych numerycznie (CNC ang. Computerized Numerical Control). Rozdział 1.3 omawia podstawowe problemy uczenia maszynowego.

Również rozdział 2 stanowi swoisty stan wiedzy dotyczy charakterystyki zastosowanych w pracy algorytmów uczenia maszynowego takich jak: Drzewa Decyzyjne, Maszyna Wektorów Nośnych SVM (ang. Support Vector Machine), Algorytm K najbliższych sąsiadów k-NN (ang. K- nearest neighbours), Perceptron Wielowarstwowy (ang. Multilayer Perceptron, MLP), LSTM (ang. Long Short-Term Memory), Jednowymiarowa neuronowa sieć splotowa (1D-CNN).

W Rozdziale 3 Doktorant poruszył problemem uodpornienia systemu na liczne efekty będące wynikiem przetrenowania i niedotrenowania modeli oraz wyeliminowania szumu i dryfu. Omówił On wybrane problemy oraz metody zapobiegania ich negatywnym skutkom. Rozdział ten stanowi swoisty stan wiedzy.

Rozdział 4 zawiera koncepcję struktury inteligentnych systemów diagnozowania maszyn sterowanych numerycznie i procesów technologicznych.

W rozdziale 4.1 Doktorant przeprowadził analizę istniejących rozwiązań inteligentnego systemu diagnozowania w warstwie programowej opierającej się na strategii Predykcyjnego Utrzymania Ruchu.

Rozdział 4.2 omawia ideę architektury systemu diagnostycznego w warstwie sprzętowo-pomiarowej. Doktorant opracował i wykorzystał rejestrator danych pomiarowych w badanych procesach frezowania, wytłaczania i zagadnieniu klasyfikacji niewyważenia układu napędowego. Doktorant bazując na metodach inteligencji obliczeniowej wykorzystał metodę szybkiego prototypowania (ang. rapid prototyping) inteligentnych systemów diagnozowania. Doktorant wykorzystał platformę działającą w środowisku Matlab&Simulink.



W ramach realizacji niniejszej rozprawy platforma została rozbudowana i wyposażona m.in. w zdalny dostęp przy zastosowaniu architektury chmurowej (za pomocą usługi Easy Access 2.0).

Rozdział 5 dotyczy diagnozowania wybranych elementów maszyn sterowanych numerycznie. Podrozdział 5.1 dotyczący prognozowania zużycia narzędzia w procesie frezowania stanowi przegląd literatury.

W powyższej analizie stanu wiedzy Doktorant wykazał, iż wiele publikacji bazuje na gotowych, zbiorach danych, ograniczając się jedynie do wykorzystania metod inteligencji obliczeniowej do predykcji uszkodzenia narzędzia. Doktorant w niniejszej rozprawie przeprowadził niezbędne eksperymenty i prace badawcze zmierzające do utworzenia własnego zbioru danych. **Na ich podstawie opracował model regresyjny do estymacji żywotności narzędzia.** Analogicznie postąpił On w przypadku opracowania stanowiska wibrodiagnostycznego. Z przeprowadzonej analizy Doktorant wnioskuje, że sposób postępowania dla prognozowania uszkodzenia narzędzia jest analogiczny jak w przypadku predykcji zużycia łożysk czy klasyfikacji błędów w procesach technologicznych takich jak proces wytłaczania (rozdział 6).

Rozdział 5.1.2 poświęcony jest opisowi metodyki przeprowadzania eksperymentów. **Bazę danych pomiarowych utworzono na podstawie zaprojektowanych eksperymentów procesu frezowania.** W ramach przeprowadzanych eksperymentów, zarejestrowano wartości amplitudy drgań i natężenia prądu, które potencjalnie mogły mieć wpływ na tempo zużywania się narzędzia. **Autor rozprawy przeprowadził szereg pracochłonnych trwających kilka miesięcy eksperymentów, w wyniku których powstała unikalna baza danych zawierająca sygnały pomiarowe z 20 kanałów i 968 cyklami frezowania. Dla zgromadzonej bazy danych Doktorant opracował metadane pozwalające na powiązanie każdego cyklu z parametrami procesu.**

Rozdział 5.2 dotyczy **realizacji systemu diagnozowania niewyważenia działającego w czasie rzeczywistym, opracowanego za pomocą metod szybkiego prototypowania i algorytmu MLP.** Prace zrealizowano na bazie autorskiego stanowiska wibrodiagnostycznego. Właściwą część podrozdziału poprzedza analiza literatury (5.2.1 i 5.2.2) ukierunkowana na metody diagnozowania stanu łożysk, których charakterystyka drgań ma bezpośrednie przełożenie na rodzaj ich uszkodzenia. **Istotną część rozdziału 5.2. stanowi podrozdział 5.2.3. omawiającą autorską metodykę przeprowadzania eksperymentów na stanowisku wibrodiagnostycznym.**

W Rozdziale 6 Autor opisał metodę diagnozowania procesu wytłaczania zrealizowaną za pomocą klasyfikatora w postaci drzewa decyzyjnego bazującego

na danych pochodzących z ultradźwiękowego czujnika odległości. Metoda porównana została z wybranym zbiorem płytkich i głębokich algorytmów inteligencji obliczeniowej. W podrozdziale 6.1 Doktorant przeprowadził analizę problemu (opartą na stanie wiedzy) diagnozowania procesu wytłaczania za pomocą metod Inteligencji Obliczeniowej. **Istotną częścią rozdziału 6 jest rozdział 6.2 opisujący metodykę przeprowadzania eksperymentów wytwarzania detalu wytłoczonego na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego. Podrozdziały 6.3 oraz 6.4 opisują autorski algorytm klasyfikacji.** Przeprowadzono 62 procesy wytłaczania, rejestrując określone parametry techniczne, służące w dalszej części pracy jako dane wejściowe do algorytmów klasyfikacji.

Jak wskazano w rozdz. 6.3, danymi wejściowymi dla klasyfikatora były współczynniki wielomianu trzeciego stopnia, wyznaczone za pomocą aproksymacji sygnału pomiarowego. Jako miarę dopasowania wielomianu do sygnału rzeczywistego wykorzystano wartość sumy kwadratów błędów (SSE).

Rozdział 6.5 obejmuje analizę wyników autorskiego rozwiązania i porównanie z innymi metodami inteligencji obliczeniowej.

Zaproponowaną metodę Doktorant porównał z innymi algorytmami klasyfikującymi, bazującymi na tych samych danych wejściowych jak w przypadku wybranego najlepszego zestawu danych dla drzewa decyzyjnego. Doktorant przetestował metody: analiza dyskryminacyjna (liniowa i kwadratowa), regresja logistyczna, naiwny klasyfikator Bayesa, SVM oraz kNN. Zastosowano 10-krotny test krzyżowy (ang. cross-validation) i 10-krotne powtórzenie uruchomień algorytmów.

Doktorant porównał opracowaną metodę z dwoma rodzajami sieci głębokich – algorytmem LSTM (rozdział 2) oraz jednowymiarową siecią splotową (1D-CNN).

Podsumowując, zaproponowane w rozdziale 6 rozwiązanie do diagnozowania procesu wytłaczania jest nowatorskie. Dodatkowo, cenną zaletą zaproponowanego rozwiązania jest wykorzystanie do klasyfikacji tylko początkowego fragmentu przebiegu sygnału. Ma to istotne znaczenie z punktu widzenia ekonomicznego, bowiem oszczędza się czas i koszty poniesione na wyprodukowanie wadliwego towaru.

ANALIZA ŹRÓDEŁ

Wykaz literatury obejmuje 223 pozycje z różnych dziedzin wiedzy związanej z rozprawą. Bogata bibliografia dowodzi, że Doktorant bardzo dobrze zapoznał się z tematyką przedmiotu. Należy podkreślić, że w tym przypadku wymagało to bardzo dużego nakładu pracy, ponieważ problematyka pracy obejmuje kilka interdyscyplinarnych dziedzin wiedzy, z których większość była wynikiem autorskich dociekań, wykraczających poza wiedzę zdobytą w trakcie studiów.

W bibliografii zabrakło mi aktualnej polskiej monografii związanej z tematyką rozprawy: Marek Fidali "Metody diagnostyki maszyn i urządzeń w predykcyjnym utrzymaniu ruchu", Elamed Media Group, 2022.

ZWIĘŻŁOŚĆ I POPRAWNOŚĆ REDAKCYJNA ROZPRAWY

Przedłożona rozprawa prezentuje w sposób szczegółowy, w przejrzystym układzie, najważniejsze wyniki pracy. Widoczna jest dbałość Doktoranta o należyty poziom edytorski, zarówno wykresy oraz rysunki przygotowane zostały z dużą starannością.

Pragnę stwierdzić, że z edytorskiego i redakcyjnego punktu widzenia rozprawa napisana została nad wyraz starannie, niemniej Autor nie uniknął wielu redakcyjnych potknięć, co zresztą musiało mieć miejsce w pracy obejmującej blisko 156 stron plus bibliografia i załączniki. Poniżej, w uwagach krytycznych pozwalam sobie wskazać drobne niedociągnięcia.



PODSUMOWANIE

1. Doktorant dokonał obszernego przeglądu literatury w zakresie wykorzystania metod inteligencji obliczeniowej w diagnozowaniu procesów technologicznych i diagnostyce maszyn i ich podzespołów. Doktorant uzasadnił w pracy rozproszenie stanu wiedzy po wszystkich rozdziałach a nawet w załącznikach, dając go każdorazowo na wstępie danego rozdziału, celem zachowania ciągu myślowego.
2. Autor rozprawy przedstawił koncepcję inteligentnego systemu do zadań diagnozowania zarówno w warstwie programowej oraz sprzętowo-pomiarowej dla trzech **różnych**, występujących w przemyśle, problemów diagnozowania:
 - Estymacji żywotności narzędzia skrawającego w procesie frezowania,
 - Oceny niewyważenia układu napędowego,
 - Diagnozowanie procesu wytłaczania.
3. Doktorant zgromadził unikalny zbiór danych, będących wynikiem autorskich eksperymentów. Eksperymenty te Autor zaplanował, wykonał przetwarzając dane pomiarowe. W konsekwencji powstała finalna baza danych pomiarowych w procesie frezowania, wytłaczania i w diagnozowaniu niewyważenia układu napędowego. Na podstawie uzyskanych danych, dokonał On oceny żywotności narzędzia frezującego.
4. Doktorant wykazał, że możliwe jest wystarczająco wczesne wykrywanie stanów awaryjnych maszyn sterowanych numerycznie (CNC) przy wykorzystaniu metod inteligencji obliczeniowej i akceptowalnym poziomie dokładności (ok. 95%) oraz satysfakcjonujących wskaźnikach jakości układu diagnostycznego, co dowodzi postawionej tezie.
5. Autor przeprowadził klasyfikację stanu niewyważenia układu napędowego w czasie rzeczywistym przy wykorzystaniu perceptronowej sieci neuronowej. Do uczenia algorytmu wykorzystał On wcześniej zebraną bazę danych.
6. Doktorant krytycznie ocenił metody uczenia głębokiego (LSTM, 1D-CNN) w diagnostyce procesu wytłaczania, bowiem czas ich uczenia jest niewspółmierny do osiągniętych rezultatów. Metoda aproksymacji wielomianem jest szybsza w uczeniu i łatwiejsza w implementacji w systemach wbudowanych.
7. Doktorant zgromadził unikalny zbiór danych dla procesu frezowania z pełnego cyklu życia kilkunastu narzędzi.

8. Autor rozprawy przygotował efektywny algorytm działający w czasie rzeczywistym do klasyfikacji niewyważenia układu napędowego.
9. Z praktycznego punktu widzenia możliwości wdrożenia w warunkach przemysłowych, Autor rozprawy zaproponował zastosowanie metod płytkich, które są łatwe w implementacji i niewymagające dużych zasobów sprzętowych możliwych do wdrożenia np. w systemach wbudowanych.
10. Przy ocenie jakości Doktorant zastosował metryki niewymagające dużej złożoności obliczeniowej. Nierzadko należy diagnozować procesy szybkie i wielkoseryjne, w których w ciągu minuty wytwarzanych jest kilkaset detali, a na klasyfikację pozostają milisekundy.
11. Doktorant opracował oprogramowanie niskopoziomowe dla sterownika PAC w języku ST, służącego do: komunikacji z falownikiem, panelem HMI i komputerem PC, odczytu danych z czujników oraz sterowania układem napędowym stanowiska wibrodiagnostycznego.

ORYGINALNOŚĆ ROZPRAWY

Wszystkie testy i badania były przeprowadzane w warunkach rzeczywistych. Często rozprawy doktorskie, które przyszło mi recenzować ograniczają się jedynie do symulacji komputerowych i nie obejmują badań eksperymentalnych.

Autor zamieścił rzetelne opisy stanowisk badawczych (zawarte w załącznikach), a także przedstawił szczegółową metodykę pomiarów.

UWAGI KRYTYCZNE

Pragnę stwierdzić, że z edytorskiego i redakcyjnego punktu widzenia rozprawa napisana została nad wyraz starannie, niemniej Autor nie uniknął kilku redakcyjnych potknięć, co zresztą musiało mieć miejsce w pracy obejmującej 179 stron.

Poniżej pozwalam sobie wskazać niedociągnięcia, które podczas lektury niniejszej rozprawy zauważyłem:

1. Niestandardowy układ pracy. Cel i teza pracy wymieszana ze stanem wiedzy,
2. W wykazie skrótów i oznaczeń brak wyjaśnień: LSTM, SSE, SPe, ACC, SEN, PAC,
3. Strona 16; styl: „Nie wszystkie miary są jednak tak samo przydatne i skorelowane z uszkodzeniem narzędzia lub elementu maszyny, np. łożyska.
4. Przegląd literatury porozrzucany jest po całej rozprawie włącznie z załącznikami,



5. Strona 101: styl: „6.3. Propozycja algorytmu klasyfikującego i dane wejściowe”,
6. Strona 114: „Podsumowując, zaproponowane w rozdziale 5 rozwiązanie do diagnozowania”. Powinno być: „w rozdziale 6”,
7. Nieczytelne niektóre rysunki, na przykład część rys. 5.1.3 na stronie 66 – brak opisu osi, brak jednostek.

WNIOSEK KOŃCOWY

Zakres i poziom uzyskanych wyników badawczych odpowiada ustawowym (Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym ...Dz. Ustaw Nr 65 z dnia 16.04.2003, poz. 595) i zwyczajowym wymaganiom (**znacząco je przekraczając**), stawianym rozprawom na stopień doktora nauk technicznych.

Dalsze kierunki przedstawiono w rozdziale 7.2. Rzadkością jest tak obszerne przedstawienie dalszych kierunków badań. Świadczy to pozytywnie o ambicjach naukowca chcącego się rozwijać.

Uwzględniając wyżej wymienione dokonania Doktoranta, wnioskuję zatem do Wysokiej Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Rzeszowskiej **o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Autora, mgr inż. Grzegorza Piecucha do jej publicznej obrony.**



Osiągnięcia mgr inż. Grzegorza Piecucha istotne z punktu widzenia zaliczenia rozprawy do wyróżniającej w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Autor rozprawy przedstawił koncepcję inteligentnego systemu do zadań diagnozowania zarówno w warstwie programowej oraz sprzętowo-pomiarowej dla trzech **różnych**, występujących w przemyśle, problemów diagnozowania w procesach: frezowania, wytłaczania oraz niewyważenia układu napędowego.

Każdorazowo Autor we własnym zakresie zaprojektował i przeprowadził eksperymenty badawcze, wykonał stanowisko pomiarowe, **przygotował programowo rejestrator danych, zebrał i przetworzył bazę danych oraz opracował i przetestował metody inteligencji obliczeniowej.**

Dla przypadku diagnozowania układu napędowego Autor przygotował od podstaw kompletne stanowisko laboratoryjne i przetestował dodatkowo online klasyfikator perceptronowej sieci neuronowej wykorzystując metodę szybkiego prototypowania.

Dla problemu estymacji żywotności narzędzia w procesie frezowania **Doktorant wygenerował unikalną bazę danych pomiarowych** dla 13 narzędzi od nowości, aż do ich uszkodzenia. Autor rozprawy przeprowadził **szereg pracochłonnych trwających kilka miesięcy eksperymentów**, w wyniku których powstała baza danych zawierająca sygnały pomiarowe z 20 kanałów i 968 cyklami frezowania. **Dla zgromadzonej bazy danych Doktorant opracował metadane pozwalające na powiązanie każdego cyklu z parametrami procesu.**

Dla diagnozowania procesu wytłaczania Autor rozprawy opracował i opisał nowatorską metodę bazującą na danych otrzymywanych z czujnika odległości, która opiera się na aproksymacji wielomianami i klasyfikacji za pomocą drzew decyzyjnych.

W rozprawie Doktorant wykorzystał szereg narzędzi informatycznych, w tym: środowisko Matlab&Simulink do integracji i przygotowania danych, ekstrakcji i selekcji cech oraz testowania algorytmów płytkich i głębokich. Język Python został przez Autora użyty do wyszukiwania fragmentów szeregów czasowych. Doktorant zastosował nowoczesne środowisko programistyczne TwinCAT3 w rejestracji danych i komunikacji ze sterownikiem PAC, falownikiem oraz panelem HMI.

