

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
Pana mgr. inż. Tomasza Mączki
pt. *Zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej i wspomagania decyzji*
w systemach produkcyjnych
opracowana na zlecenie Rady Wydziału Elektrotechniki i Informatyki
Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza

1. Obszar problemowy

Dynamiczny rozwój możliwości technicznych i programowych monitoringu złożonych procesów produkcyjnych oraz przetwarzania ogromnych zbiorów danych stawiają coraz to wyższe wymagania przed przemysłowymi systemami informatycznymi. Opiniowana rozprawa wychodzi naprzeciw tym wymaganiom, co jednoznacznie zostało sformułowane na str. 24 poprzez stwierdzenie, iż celem pracy jest „*opracowanie uniwersalnej architektury sprzętowo-pomiarowej systemu informatycznego do monitorowania i diagnozowania procesów produkcyjnych. Badania powinny być przeprowadzone w odniesieniu do rzeczywistych procesów produkcyjnych i przy zastosowaniu metod inteligencji obliczeniowej, a zwłaszcza metod klasyfikacji danych.*”

Na podstawie dobrego przeglądu stanu badań na świecie w odniesieniu do systemów monitorująco-diagnostycznych dla procesów obróbkowych autor ograniczył swoje badania do rozbudowy systemu informatycznego do monitorowania pracy maszyn oraz operatorów w przedsiębiorstwach produkcyjnych opracowanego przez zespół z Katedry Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Zaproponowano zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej, a w szczególności algorytmów klasyfikacji danych, do projektowania i implementacji systemów monitorująco-diagnostycznych. Opracowano metodykę szybkiego prototypowania systemów monitorująco-diagnostycznych opartą w warstwie sprzętowej na komputerach przemysłowych firmy *Beckhoff*, a w warstwie programowej na wykorzystaniu podsystemu uruchomieniowego czasu rzeczywistego TwinCAT 3 oraz środowiska *Matlab/Simulink*. Na przykładzie analizy pracy pras do kucia na zimno w firmie Gaweł Zakład Produkcji Śrub SA (GZPŚ) rozwiązano zagadnienie automatycznego pozyskiwania wiedzy o procesie produkcji elementów złącznych na podstawie

danych zarejestrowanych w systemie monitorowania produkcji. Pokazano ocenę użyteczności pozyskanej maszynowo wiedzy, a w konsekwencji sformułowano wytyczne do skonstruowania systemu wspomagania decyzji w zakresie zarządzania produkcją. Badając zagadnienia diagnostyki procesu obróbki skrawaniem zaproponowano trzy struktury systemów diagnostycznych bazujące na algorytmach detekcji nowości oraz klasyfikatorach wieloklasowych. Ocenę skuteczności działania zaproponowanych systemów pokazano na przykładzie dwóch problemów diagnostyki w obszarze obróbki skrawaniem: niewyważenia układu wrzeciono-narzędzie oraz procesu wiercenia. Weryfikacja działania systemów diagnostycznych przeprowadzona była w trybie *offline*, na bazie wcześniej zarejestrowanego zbioru danych, ale zostały sformułowane wymagania dotyczące realizacji takich systemów w czasie rzeczywistym.

2. Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Rozprawa doktorska o ogólnej objętości 173 stron opracowana została w języku polskim i składa się z czterech rozdziałów, krótkiego podsumowania wyników oraz kierunków dalszych badań. Załączony wykaz cytowanej literatury zawiera 150 pozycji, jest obszerny i raczej dobrze odzwierciedla stan badań w zakresie tematyki rozprawy prowadzonych w kraju i na świecie. Odczuwalny jest jednak brak podstawowych pozycji książkowych wydanych w kraju z zakresu sztucznych sieci neuronowych autorstwa np. Tadeusiewicza, Osowskiego czy Korbicz. Rozprawę uzupełniają trzy krótkie dodatki dotyczące oceny skuteczności klasyfikatorów, miar czasowych i częstotliwościowych sygnałów oraz oprogramowania *OnceClassExperimenter* i *MultiClassExperimenter*.

Bardzo dobrze opracowany jest rozdział pierwszy, który stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy oraz zawiera rozbudowaną ocenę stanu wiedzy na podstawie szerokiego przeglądu literatury.

Z merytorycznego punktu widzenia najważniejsze są rozdziały drugi, trzeci i czwarty, w których przedstawiono zaproponowane rozwiązania dotyczące systemu monitorująco-diagnostycznego dla przemysłowych procesów obróbkowych. I tak rozdział drugi został poświęcony zagadnieniom koncepcji i realizacji zintegrowanej informatycznej platformy sprzętowo-programowej, przeznaczonej do monitorowania i diagnozowania procesów produkcyjnych. Pokazano i omówiono kolejne etapy rozwoju systemu informatycznego przeznaczonego do monitorowania pracy maszyn i operatorów w przedsiębiorstwie produkcyjnym opracowanego przez zespół z Katedry Informatyki i Automatyki PRz na potrzeby firmy Gawel

Zakład Produkcji Śrub SA. Zaproponowano szybkie prototypowanie systemów monitorująco-diagnostycznych bazujące w warstwie sprzętowej na komputerach firmy *Beckhoff*, a w warstwie programowej na podsystemie uruchomieniowym czasu rzeczywistego *TwinCAT* oraz środowiska *Matlab/Simulink*. W znacznym stopniu przyjęto zastosowanie algorytmów obliczeń inteligentnych w takich systemach. Jest to dobrze opracowany rozdział z wyraźnym i jednoznacznym wkładem autora rozprawy w rozwój i modernizację systemu będącego wynikiem pracy zespołowej.

Z kolei rozdział trzeci dotyczy zagadnień zastosowania metod obliczeń inteligentnych do odkrywania wiedzy o procesie produkcji elementów złącznych na podstawie danych zarejestrowanych w systemie monitorowania produkcji. Omówiono problem automatycznego pozyskiwania i przygotowywania danych dla eksperymentów, ale przede wszystkim zaproponowano analizę efektywności pracy pras do kucia na zimno. W procesie pozyskiwania wiedzy zastosowano klasę rozmytych systemów Takagi-Sugeno, w których wszystkie zmienne wejściowe mają liniowe i komplementarne funkcje przynależności zbiorów rozmytych. W rozdziale tym przeprowadzono również analizę wydajności pras do kucia na zimno z zastosowaniem algorytmu C 5.0, który umożliwia uzyskanie modeli w formie regułowej. Uzyskane wyniki badań zostały potwierdzone przez ekspertów dziedzinowych z firmy GZPS jako odkrycie użytecznej wiedzy.

Ostatni – obszerny, bo 56-stronicowy – rozdział został poświęcony diagnostyce procesu obróbki skrawaniem. Zaproponowano trzy struktury systemów diagnostycznych z wykorzystaniem algorytmów detekcji nowości oraz klasyfikatorów wieloklasowych. Rozważane struktury systemów diagnostycznych to system typu SD-1 z klasyfikatorami znanych stanów odmiennych oraz szczegółowymi stanami odmiennymi, system SD-2 ze złożonymi z k połączonych szeregowo jednoklasowych klasyfikatorów szczegółowych stanu odmiennego oraz system SD-3, w którym zastosowano złożony z k połączonych równolegle jednoklasowych klasyfikatorów szczegółowych stanu odmiennego. Przeprowadzono badania algorytmów klasyfikacji jednoklasowej z zastosowaniem autoasocjacyjnej sieci neuronowej oraz jednoklasowej maszyny wektorów wspierających. Wykonano też szerokie badania algorytmów klasyfikacji wieloklasowej z wykorzystaniem sieci neuronowych (sieci probabilistyczne, perceptron wielowarstwowy, sieci radialne typu RBF) oraz drzew decyzyjnych (pojedyncze drzewo, wzmocnione drzewo). Wprowadzono trzy typy miar jakości, na bazie których przeprowadzono całościową ocenę zaproponowanych struktur systemów diagnostycznych bez analizy ich struktury wewnętrznej. Weryfikacje zaproponowanych rozwiązań przeprowadzono na przykładzie diagnostyki niewyważenia układu wrzeciono-narzędzie maszyny CNN Has VM-3 oraz diagnostyki procesu wiercenia na tej maszynie. Eksperymenty zostały przeprowadzone w laboratorium HFO-HTEC

Katedry Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej. Przedstawione liczne wyniki wykonanych eksperymentów i testów w postaci tabel i wykresów bardzo dobrze ilustrują zalety i możliwości zaproponowanych rozwiązań.

Na podstawie skrótowego omówienia treści rozprawy doktorskiej stwierdzam, że mgr inż. T. Mączka wykazał się bardzo dobrymi umiejętnościami formułowania problemów naukowo-technicznych, które rozwiązał z wykorzystaniem właściwych metod badawczych wraz z zastosowaniem zaawansowanych badań eksperymentalnych z użyciem danych przemysłowych. Rozprawa posiada charakter praktyczno-teoretyczny, a do opisu metod i algorytmów zastosowano formalizm matematyczny właściwy dla dyscypliny *informatyka*. Ponadto wykazał się bardzo dobrą wiedzą, m.in. z takich metod badawczych jak projektowanie systemów informatycznych, systemy wspomagania decyzji, metody inteligencji obliczeniowej, w tym sztuczne sieci neuronowe, pozyskiwanie i wydobywanie wiedzy z dużych zbiorów danych, klasyfikacja danych, czy diagnostyka procesów i obiektów.

3. Oryginalne osiągnięcia

Realizując cel badawczy, doktorant uzyskał kilka ciekawych i oryginalnych wyników naukowych oraz praktycznych. Pokazał możliwość opracowania efektywnego podejścia do rozwiązania trudnego problemu monitorowania i diagnostyki procesów produkcyjnych. Do ważnych osiągnięć naukowych mgr. inż. T. Mączki należy zaliczyć następujące:

1. Opracowanie architektury sprzętowo-programowej dla systemu monitorowania i diagnostyki procesów produkcyjnych oraz metodyki szybkiego prototypowania takich systemów z zastosowaniem podsystemu *TwinCAT 3* i środowiska *Matlab/Simulink* oraz metod inteligencji obliczeniowej.
2. Opracowanie trzech nowych struktury systemów diagnostycznych z wykorzystaniem algorytmów detekcji nowości oraz klasyfikatorów jedno- i wieloklasowych.
3. Zastosowanie metod obliczeń inteligentnych do odkrywania wiedzy o procesie produkcji elementów złącznych na podstawie danych zarejestrowanych w systemie monitorowania produkcji. W procesie pozyskiwania wiedzy zastosowano klasę rozmytych systemów Takagi-Sugeno, w których wszystkie zmienne wejściowe mają liniowe i komplementarne funkcje przynależności zbiorów rozmytych.
4. Rozszerzenie metodyki oceny jakości działania klasyfikatorów jednoklasowych poprzez zaproponowanie nowego sposobu generowania zbiorów uczących i testowych, badanie

średniego czasu budowy modelu i średniego czasu klasyfikacji nowego rekordu oraz nowego wskaźnika jakości integrującego miary dokładności, czułości i specyficzności, jak również pola pod krzywą ROC.

5. Przeprowadzenie praktycznej weryfikacji, na podstawie danych pozyskanych z obrabiarki CNC Has VM3, zaproponowanej metodyki doboru systemów diagnostycznych dla zagadnienia niewyważenia układu wrzeciono-narzędzie dla procesu wiercenia.
6. Opracowanie oprogramowania w języku Python oraz C# stanowiącego:
 - implementację zaproponowanej metodyki doboru systemów diagnostycznych,
 - realizację integracji i przygotowania danych z rzeczywistych systemów informatycznych przedsiębiorstwa,a także oprogramowania dla pakietów *Matlab* i *Simulink* służącego do realizacji eksperymentów w czasie rzeczywistym.

Przedstawione w rozprawie oryginalne wyniki naukowe, potwierdzone i zweryfikowane na rzeczywistych danych przemysłowych, w znacznym stopniu zostały już opublikowane przez doktoranta w 12 pozycjach, obejmujących 1 artykuł w *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, 2 referaty w serii *LNCS Springer'a*, 5 artykułów w pracach zbiorowych wydanych np. w serii *Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer)*, *Manufacturing Systems (InTech)* czy *Projektowanie, analiza i implementacja systemów czasu rzeczywistego (WKŁ)*. Wygłaszał referaty na ważnych międzynarodowych konferencjach, np. *IEEE Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing* czy *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, jak również krajowych, np. *Diagnostyka Procesów i Systemów*. Jest to dobra aktywność publikacyjna doktoranta, ale z drugiej strony odczuwalny jest wyraźny brak wiodącego artykułu opublikowanego w czasopiśmie z listy *JCR*.

Uwzględniając wymienione oryginalne wyniki badań i osiągnięcia naukowe wraz z osiągnięciami praktycznymi uważam, że mgr inż. Tomasz Mączka w pełni zrealizował założony cel badawczy.

4. Uwagi i komentarze

Ogólnie całą rozprawę oceniam bardzo pozytywnie pod względem merytorycznym i uważam ją za bardzo wartościową z uwagi na jej praktyczny charakter, potwierdzony przykładami rzeczywistych procesów produkcyjnych (obróbka skrawaniem), a przedstawione niżej uwagi i komentarze w znacznej mierze mają charakter dyskusyjny.

1. Metoda badawcza zaproponowana w rozprawie oparta na klasyfikatorach wymaga posiadania danych, które charakteryzują stany normalne oraz stany odmienne. Wymóg taki jest niezbędny, aby można było zaprojektować i zbudować układ diagnostyki uszkodzeń. Z drugiej strony wiadomo, że uzyskanie danych do uczenia klasyfikatorów dla stanów odmiennych jest czasami wręcz niemożliwe w zastosowaniach przemysłowych. Na str. 78 jest tylko lakoniczne stwierdzenie: „*Jeżeli nie jest to możliwe, dane są generowane sztucznie.*” Co oznacza „sztucznie”? Jak ten trudny problem praktyczny rozwiązywany jest w diagnostyce technicznej? Na przykład (str. 97) jak są generowane zbiory danych *Dabnormal1, ..., Dabnormalk*?
2. Na str. 79 zaproponowano system diagnostyczny złożony m.in. z zespołu klasyfikatorów. Niestety, w dalszej części rozprawy nie podano jak są zbudowane takie zespoły – czy są jednorodne czy różnorodne? Jaka jest dokładność klasyfikacji takich struktur? W tym zakresie w literaturze znanych jest wiele rozwiązań oraz analiz dokładności pracy takich klasyfikatorów.
3. Uwagi redakcyjne:
 - a) Odczuwalny jest brak
 - sformułowania tezy rozprawy,
 - podsumowań rozdziałów drugiego i trzeciego, które powinny stanowić pewne logiczne i merytoryczne połączenia między rozdziałami.
 - b) Dyskusyjne jest odsyłanie czytelnika (str. 93) do pozycji literaturowej [130, Haykin], książki trudno dostępnej w języku angielskim, w sytuacji gdy w kraju zostało wydanych kilka bardzo dobrych książek z zakresu sieci neuronowych, np. Tadeusiewicza, Korbicza i in., czy Osowskiego. Tym bardziej, że dotyczy to wprowadzenia do sieci typu MLP i RBF.
 - c) Kilka drobnych literówek występuje na str. 23 i 101.

5. Podsumowanie

Mając na uwadze wszystkie aspekty recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Mączki, a w szczególności odnotowane oryginalne osiągnięcia naukowe i bardzo ważne badania przemysłowo-laboratoryjne, jak również zamieszczone uwagi ogólne o charakterze dyskusyjnym,

- **stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania stosownej ustawy o tytule i stopniach naukowych w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie *informatyka*,**
- **wnoszę o jej przyjęcie przez Radę Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej.**

