

**Recenzja
pracy doktorskiej
mgr inż. Tomasza Mączki**

**Zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej i wspomaganie decyzji
w systemach produkcyjnych**

1. Tematyka rozprawy

Tematem rozprawy są zagadnienia pozyskiwania wiedzy z danych rejestrowanych z procesów produkcyjnych oraz projektowania algorytmów diagnostyki on-line maszyn z wykorzystaniem metod inteligencji obliczeniowej (*Computational Intelligence* - CI). Dodatkowo rozważany jest problem budowy struktur sprzętowo-programowych systemów monitorujących i diagnostycznych dla procesów wytwórczych.

W nowoczesnych systemach sterowania i monitorowania procesów gromadzone są duże zbiory danych dotyczących produkcji, w tym danych pomiarowych z pracujących maszyn. W praktyce dane te są wykorzystywane rzadko, zatem korzyści z ich archiwizacji są ograniczone. Badania dotyczące wykorzystania metod inteligencji obliczeniowej do drażenia danych (*data mining*) lub odkrywania wiedzy z baz danych (*knowledge discovery in databases*) w celu zwiększenia efektywności procesów produkcyjnych są bardzo aktualnym tematem prac badawczych, mających wysoką rangę praktyczną. Mechanizmy odkrywania wiedzy mogą być wykorzystane do tworzenia systemów wspomaganie decyzji dla operatorów maszyn i procesów.

Równie ważna jest tematyka automatycznego diagnozowania maszyn w czasie procesu produkcyjnego. Wczesne rozpoznawanie powstających uszkodzeń (stanów nienormalnych) umożliwia podejmowanie właściwych decyzji przez operatorów maszyn mających wpływ zarówno na jakość wytwarzanych wyrobów, a także bezpieczeństwo pracy urządzeń produkcyjnych. Diagnostyka on-line maszyn i procesów określana także jako monitorowanie stanu stanowi podstawę tzw. strategii utrzymania według stanu (*Predictive Maintenance*).

Temat rozprawy jest bardzo aktualny, gdyż z jednej strony dotyczy ważnych zagadnień technicznych, a z drugiej wymaga do ich rozwiązania doboru i aplikacji metod inteligencji obliczeniowej, zwłaszcza zaawansowanych metod klasyfikacji danych.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy było:

- opracowanie uniwersalnej architektury sprzętowo-programowej systemu informatycznego przeznaczonego do monitorowania i diagnozowania procesów produkcyjnych,

- zaproponowanie sposobu syntezy systemu automatycznego wnioskowania o efektywności procesu kucia na zimno,
- opracowanie metodyki konstruowania systemów diagnostycznych dla procesu obróbki skrawaniem.

Zamierzeniem Autora było wykazanie praktycznej użyteczności badanych metod do budowy systemów monitorowania i diagnozowania procesów produkcyjnych jako systemów czasu rzeczywistego realizowanych na platformie automatyki przemysłowej. Dlatego nie ograniczył się on do badań symulacyjnych, ale podjął trud przeprowadzenia badań przemysłowych.

3. Zawartość i struktura rozprawy

Praca liczy 173 strony i składa się ze: spisu treści, wykazu skrótów, pojęć i oznaczeń, 5 rozdziałów, 3 dodatków, bibliografii, spisu rysunków i tablic. Wprowadzenie zawiera opis motywacji do podjęcia problematyki rozprawy, przegląd stanu badań i techniki w zakresie pozyskiwania wiedzy z baz danych oraz metod diagnostyki on-line procesów obróbkowych z wykorzystaniem metod inteligencji obliczeniowej, a także określenie celu i zakresu pracy.

W rozdziale 2 zawarto analizę i syntezę architektury sprzętowo-programowej systemu monitorująco-diagnostycznego dla procesów produkcyjnych. W rozdziale 3 zaprezentowano zastosowanie metod CI do odkrywania wiedzy z danych dotyczących procesu kucia na zimno w zakładzie *Gawel Zakład Produkcji Śrub S.A.*. Opisane eksperymenty i uzyskane wyniki odnoszą się do badania czynników wpływających na efektywność i wydajność pracy pras. Diagnostyka procesu obróbki skrawaniem jest tematem rozdziału 4. Zawiera on metodykę konstruowania systemów monitorująco - diagnostycznych dla procesu obróbki skrawaniem. Zaproponowano trzy struktury systemów diagnostycznych, bazujące na algorytmach detekcji nowości oraz klasyfikatorach wieloklasowych. Omówiono właściwości struktur oraz sposób oceny skuteczności działania systemów diagnostycznych i zawartych w nich klasyfikatorów. Zweryfikowano eksperymentalnie proponowaną metodykę dla dwóch problemów diagnostyki w obszarze obróbki skrawaniem: niewyważenia układu wrzeciono-narzędzie oraz procesu wiercenia. W rozdziale 5 podano podsumowanie uzyskanych wyników oraz kierunki dalszych prac.

Wykaz literatury jest obszerny i wyczerpujący, zawiera 150 pozycji. Świadczy on wraz z redakcją pracy o przeprowadzeniu przez Autora rozprawy dogłębnych studiów literaturowych w zakresie metod klasyfikacji stosowanych w diagnostyce maszyn, a także metod odkrywania wiedzy z danych.

4. Oryginalne wyniki rozprawy

Praca dotyczy badania i rozwoju nowoczesnych algorytmów inteligencji obliczeniowej w zastosowaniach do wydobywania wiedzy z baz danych oraz diagnostyki maszyn.

Osiągnięcia Autora rozprawy oraz jej oryginalne elementy dotyczą następujących zagadnień:

- a) Zastosowania nowoczesnych algorytmów klasyfikacji w diagnostyce procesu obróbki skrawaniem komponentów metalowych.
- b) Algorytmów pozyskiwania wiedzy z danych rejestrowanych z procesów produkcyjnych

- c) Opracowania uniwersalnej architektury sprzętowo-programowej systemu informatycznego przeznaczonego do monitorowania i diagnozowania procesów produkcyjnych.

Ad. a) Zasadniczym problemem diagnostyki maszyn, a także procesów przemysłowych jest trudność pozyskania zbioru danych uczących dla wszystkich stanów nienormalnych, które mogą wystąpić w diagnozowanym obiekcie. Przykładowo dla procesów chemicznych zgromadzenie takich danych jest praktycznie niemożliwe ze względu na olbrzymią liczbę możliwych uszkodzeń oraz małą częstość ich występowania. W diagnostyce urządzeń i procesów technologicznych, pewne stany także występują rzadko, ale ich liczba jest zwykle mniejsza. W przypadku diagnostyki procesów przemysłowych problem ten jest przewyżniany na drodze budowy modeli analitycznych uwzględniających wpływ uszkodzeń lub częściej przez wykorzystywanie wiedzy eksperckiej dotyczącej związku między uszkodzeniami a wartościami sygnałów diagnostycznych. Na podstawie znajomości funkcjonowania procesu oraz modeli wykorzystywanych do detekcji uszkodzeń eksperci są w stanie określić wpływ uszkodzeń na poszczególne residua. W przypadku diagnostyki maszyn do detekcji uszkodzeń stosowane są metody analizy sygnałów, dla których nie ma możliwości określenia związku między stanami nienormalnymi a wartościami cech.

Aby rozwiązać powyższy problem Autor zaproponował trzy nowe struktury systemów diagnostycznych, wykorzystujące metody detekcji nowości (klasyfikatory jednoklasowe). Założył, że dostępne są dane dotyczące stanu normalnego oraz dane dotyczące co najmniej jednego stanu odmiennego od normalnego. W przypadku zarejestrowania nowych stanów nienormalnych system diagnostyczny musi być rozszerzany. Powyższe podejście jest racjonalne, ale dosyć kłopotliwe w aplikacjach przemysłowych. Ważną zaletą proponowanych struktur jest element rozpoznawania stanu nieznanego. W diagnostyce maszyn koncepcja ta nie była znana, co podkreśla Autor, jednak w diagnostyce procesów była ona przedstawiona w monografii (2001r.) recenzenta i kilku innych publikacjach oraz zaimplementowana w systemie DiaSter.

Istotnymi osiągnięciami Autora oprócz koncepcji struktur SD-1, SD-2, SD-3 systemów diagnostycznych było:

- zaproponowanie nowej metodyki diagnostyki bazującej na klasyfikatorach jednoklasowych,
- rozszerzenie metodyki oceny jakości działania klasyfikatorów jednoklasowych proponowanej w literaturze o nowy sposób generowania zbiorów uczących i testowych,
- zaproponowanie procedury budowy i oceny systemów diagnostycznych, uwzględniającej: dobór najmniejszej wymaganej liczby cech, dobór minimalnego rozmiaru zbioru uczącego oraz procedurę generowania zbiorów uczących i testowych.

Osiągnięcia badawcze są związane z potwierdzeniem zdolności badanych klasyfikatorów do rozpoznawania stanów normalnych i nieprawidłowych. Badane były trzy algorytmy klasyfikacji jednoklasowej: autoasocjacyjna sieć neuronowa (ang. *Autoassociative Neural Network*, AANN), jednoklasowa maszyna wektorów wspierających (ang. *One-Class SVM*, OCSVM) oraz lokalny wskaźnik obserwacji odstających (ang. *Local Outlier Factor*, LOF).

Algorytmy klasyfikacji wieloklasowej są stosowane wyłącznie w systemie diagnostycznym SD-1. Służą do rozpoznania stanów nienormalnych, dla których dostępne są dane uczące. Badane były algorytmy: probabilistyczna sieć neuronowa (ang. *Probabilistic Neural Network*, PNN), pojedyncze drzewo decyzyjne *Single Decision Tree*, SDT), wzmocnione drzewa

decyzyjne (*Boosted Decision Trees*, BDT), perceptron wielowarstwowy (*Multilayer Perceptron*, MLP), sieć neuronowa z radialną funkcją bazową (*Radial Basis Function Neural Network*, RBF) oraz maszyna wektorów wspierających (*Support Vector Machine*, SVM).

Do oceny jakości klasyfikacji wybrano 4 miary: dokładność (*Acc*), czułość (*Sen*), poziom fałszywych alarmów (*FPr*) oraz pole pod krzywą ROC (*AUC*). Zaproponowano także nowy wskaźnik jakości integrujący miary dokładności, czułości, specyficzności i pola pod krzywą ROC. Poza metrykami jakościowymi, zbadano również parametry wydajnościowe algorytmów: średni czas budowania modelu klasyfikacyjnego oraz średni czas klasyfikacji pojedynczego rekordu

Uzyskane wyniki stanowią potwierdzenie przypuszczeń Autora, że nie ma jednego optymalnego algorytmu klasyfikacji w aspekcie jego aplikacji w systemie diagnostycznym. W badanych przypadkach różne algorytmy okazują wyższość nad innymi. W grupie klasyfikatorów jednoklasowych najczęściej najlepsze wyniki uzyskiwano dla algorytmu LOF, a dla klasyfikatorów wieloklasowych dla klasyfikatora MLP. Ważną zaletą klasyfikatorów jednoklasowych jest redukcja problemu niezbalansowania danych wejściowych, którego wpływ na jakość klasyfikacji uwidacznia się w przypadku klasyfikatorów wieloklasowych.

Praktyczna weryfikacja zaproponowanej metodyki projektowania systemów diagnostycznych została przeprowadzona dla dwóch różnych przypadków aplikacji systemu diagnozowania: niewyważenia układu wrzeciono-narzędzie oraz procesu wiercenia na podstawie danych pozyskanych z obrabiarki CNC Haas VM-3. Opracowano oprogramowanie w języku Python oraz C#, stanowiące implementację zaproponowanej metodyki doboru systemów diagnostycznych i zawierające narzędzia do analizy porównawczej uzyskiwanych wyników.

W pracy podjęto badania dotyczące porównanie analizowanych struktur systemów diagnostycznych. Zaproponowano trzy miary jakościowe: błąd rozpoznawania stanu normalnego, błąd rozpoznawania i-tego znanego stanu odmiennego, błąd rozpoznawania nieznanego stanu. W przypadku obydwu rozważanych w niniejszej pracy obiektów diagnozowania uzyskano dla zbiorów testowych bezbłędnie działające systemy. Nie można zatem na podstawie tych badań wyciągnąć istotnych wniosków, wszystkie struktury okazały się w pełni zadawalające.

Ad. b) Oryginalnym osiągnięciem Autora była realizacja i badania systemu automatycznego wnioskowania o efektywności i wydajności procesu kucia na zimno. Celem było wydobywanie na podstawie danych pomiarowych użytecznej wiedzy o efektywności i wydajności procesu kucia na zimno w postaci reguł. Eksperymenty były ukierunkowane na poszukiwanie czynników wpływających na efektywność produkcji, rozumianej jako procent czasu pracy maszyny w trybie automatycznym w stosunku do przyjętego czasu analizy. Poszukiwano także związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy wydajnością produkcji a realizowanymi produktami i używanymi materiałami. Miarą wydajność procesu kucia na zimno jest liczbie sztuk wytwarzanych w jednostce czasu. Dane pobierane były zarówno z systemu monitorowania SCADA, jak też z systemu zarządzania ERP.

Do pozyskania reguł dotyczących efektywności pracy maszyn wykorzystano w pracy logikę rozmytą i programowanie ekspresji genów (GEP- *Gene Expression Programming*). System rozmyty typu P1-TS wykorzystywany jest jako klasyfikator binarny typu biała skrzynka do uzyskania łatwych do interpretacji reguł. Baza reguł systemu stanowi reprezentację wiedzy dotyczącej dziedziny problemu klasyfikacji. Reguły o wydajności procesu kucia na zimno uzyskano natomiast z zastosowaniem algorytmu C5.0. Algorytm buduje wstępną postać drzewa klasyfikacyjnego wykorzystując podejście algorytmiczne *dziel i zwyciężaj*, stosując kryterium zysku informacyjnego (ang. *information gain*) przy podziale węzłów.

Testy algorytmów wydobywania wiedzy przeprowadzono na danych z procesu kucia na zimno w przedsiębiorstwie Gawel Zakład Produkcji Śrub S.A. Dla potrzeb ich realizacji opracowano oprogramowanie w języku Python oraz Java, realizujące integrację i przygotowanie danych z systemów informatycznych przedsiębiorstwa. Badania wykazały, że zaproponowane algorytmy CI umożliwiają wydobywanie wiedzy użytecznej dla kadry zarządzającej z danych w postaci reguł. Uzyskane reguły były dosyć oczywiste, szczególnie dla specjalistów z przedsiębiorstwa, ale pozwoliły na potwierdzenie słuszności zastosowanej metody pozyskania maszynowo wiedzy. A to było celem badań.

Ad. c) Ważnym rezultatem pracy jest opracowanie struktury sprzętowo-programowej systemu informatycznego przeznaczonego do monitorowania i diagnozowania procesów produkcyjnych. System ten wykorzystuje platformę automatyki przemysłowej. Autor zauważa, że podsystem odpowiadający za przetwarzanie sygnałów i diagnozowanie wymaga dostosowania do diagnozowanego obiektu. Wynika stąd praktyczna potrzeba zastosowania takiego środowiska sprzętowo-programowego, które usprawni proces opracowywania prototypu podsystemu przetwarzająco-diagnostycznego i umożliwi jego uruchomienie oraz testy w czasie rzeczywistym na sprzęcie docelowym. Proponowana idea jest zgodna z podejściem szybkiego prototypowania nowych urządzeń.

Autor proponuje zastosowanie w warstwie sprzętowej komputerów przemysłowych (IPC) firmy Beckhoff. W warstwie programowej wykorzystywany jest podsystem uruchomieniowy czasu rzeczywistego TwinCAT 3 oraz środowisko Matlab/Simulink, służące do implementacji prototypowych i docelowych rozwiązań monitorująco-diagnostycznych. Podsystem uruchomieniowy TwinCAT 3 umożliwia opracowywanie i uruchamianie wielu zadań czasu rzeczywistego na tym samym urządzeniu. Stosuje języki normy IEC 61131-3, używane powszechnie w środowisku automatyki przemysłowej oraz umożliwia uruchamianie modułów czasu rzeczywistego opracowanych w języku C/C++ lub uzyskanych za pomocą automatycznej generacji kodu ze środowisk Matlab/Simulink. Idea proponowanej struktury bazuje na przygotowywaniu prototypów (systemów/algorytmów) w środowisku Matlab/Simulink oraz wykorzystaniu tych prototypów do automatycznego generowania zadań czasu rzeczywistego i uruchamianiu ich na sprzęcie docelowym z podsystemem TwinCAT 3. Rozwiązanie to zapewnia możliwość szybkiego opracowywania prototypowych rozwiązań systemów monitorowania i diagnozowania maszyn, zapewniając spełnienie ostrych wymagań, m.in. na czasy próbkowania sygnałów.

Dodatkowym osiągnięciem Autora było opracowanie oprogramowania dla pakietów Matlab i Simulink, służącego do realizacji eksperymentów w czasie rzeczywistym.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne.

a) Analizując własności eksploatacyjne opracowanych trzech struktur systemów diagnostycznych nie wzięto pod uwagę problemu rozróżnialności uszkodzeń, przez co nie wskazano mniejszej odporności na potencjalne błędy klasyfikacji struktury SD-2 w stosunku pozostałych.

Aby dokonać analizy rozróżnialności rozpoznawanych stanów należy w przestrzeni cech zbadać obszary odpowiadające poszczególnym stanom. Dowolne stany są w przestrzeni cech rozróżnialne bezwarunkowo, jeśli odpowiadające im obszary są rozłączne. Jeśli te obszary dla dowolnej pary stanów są jednakowe, to te stany są nierozróżnialne. Jeśli obszary są różne, ale zawierają część wspólną, wtedy zachodzi rozróżnialność warunkowa. Oznacza to, że dla pewnych wartości cech stany są rozróżniane, a dla innych nie. Jeżeli w przypadku klasyfikacji w czasie rzeczywistym uzyskamy wartości cech należące do części wspólnej, to takie stany są

nierozróżnialne. Jeśli analizowane wartości cech pochodzą spoza obszaru wspólnego, to uzyskujemy rozróżnialność stanów.

Tak powinna przebiegać klasyfikacja w przypadku, gdy zbiór danych uczących jest kompletny z punktu widzenia rozróżnialności. Selekcja cech realizowana jest na podstawie dostępnych danych, które mogą nie zawierać wartości cech z obszarów wspólnych dla par uszkodzeń rozróżnialnych warunkowo. Jeżeli dla wszystkich par uszkodzeń rozróżnialnych warunkowo zbiory uczące zawierają dane reprezentujące zarówno wartości cech z obszaru wspólnego jak też z obszarów specyficznych dla tych stanów, to struktury SD-1 i SD-3 powinny funkcjonować niezawodnie. Natomiast w przypadku struktury SD-2 mogą pojawiać się błędy klasyfikacji. Dane z obszaru wspólnego dla stanów nierozróżnialnych wykorzystywane są do strojenia obu klasyfikatorów. Klasyfikatory jednoklasowe połączone są szeregowo i działają w określonej kolejności. Zatem jeśli pierwszy z dwóch rozważanych klasyfikatorów rozpozna stan jako znany, to stan ten jest wskazywany jako diagnoza i działanie systemu zostaje zakończone. Może to być stan, który nie wystąpił, a zatem diagnoza będzie fałszywa. Prawidłowa diagnoza powinna wskazywać drugi ze stanów. Oczywiście przy innym ustawieniu w szeregu obu klasyfikatorów diagnoza będzie prawidłowa. Jednak przy braku rozróżnialności prawidłowe działanie systemu diagnostycznego powinno zakończyć się wskazaniem obu stanów z informacją o braku możliwości ich rozróżnienia. Struktury SD-1 i SD-3 wskażą w tym przypadku obydwa stany, a to będzie świadczyć o braku możliwości ich rozróżnienia na podstawie uzyskanych wartości cech (należących do części wspólnej obszarów charakteryzujących te stany). Oczywiście jeśli analizowane wartości cech nie należą do części wspólnej dla obu stanów, diagnozy będą prawidłowe we wszystkich trzech strukturach SD.

b) Dyskusyjna jest celowość minimalizacji zbioru cech wykorzystywanych do klasyfikacji. Dodatkowe cechy mogą być użyteczne np. do rozróżnienia stanów rozróżnialnych warunkowo. Pewna nadmiarowość cech przyczynia się do podwyższenia odporności klasyfikacji.

c) Opracowane struktury i badania eksperymentalne dotyczyły procesów małej skali: diagnostyki niewyważenia układu wrzeciono-narzędzie oraz diagnostyki procesu wiercenia. W pierwszym przypadku wykorzystywano tylko jeden sygnał pomiarowy z akcelerometru do rozpoznania pięciu stanów, w tym stanów normalnego i nieznanego, natomiast w drugim diagnoza o jednym z czterech stanów obiektu była formułowana na podstawie pięciu sygnałów z czujników pomiarowych. Problematyka diagnostyki koncentrowała się na cząstkowych procesach wytwórczych i w tym zakresie nie mam istotnych zarzutów. Brakuje mi jednak pewnego odniesienia do diagnostyki bardziej złożonych procesów produkcyjnych, np. w skali procesów realizowanych przez pojedyncze centrum obróbcze lub całą linię produkcyjną, obejmującą wiele procesów cząstkowych. W przypadku procesów większej skali pojawiają się problemy, które w pracy nie są dyskutowane. Przykładowo system diagnostyczny dla procesów większej skali powinien rozpoznawać stany techniczne jednostek napędowych, np. silników, do diagnostyki których mogą być stosowane metody bazujące na modelach. Dlatego system diagnostyki złożonych procesów produkcyjnych powinien integrować metody analizy sygnałów jak też metody bazujące na modelach. Innymi pojawiającymi się problemami są: dobór optymalnego zbioru urządzeń pomiarowych, odporności systemu diagnostycznego na uszkodzenia sensorów oraz dekompozycja zadań diagnostycznych.

d) Zaproponowana procedura projektowania systemu diagnostycznego w tym klasyfikatorów jednoklasowych wymaga wysokich kompetencji. Czy w firmach małych

i średniej wielkości realne jest wdrażanie takich systemów przez pracowników? Niezbędne stają się chyba specjalistyczne firmy inżynierskie.

Pozostałe uwagi dotyczą drobnych usterek:

- e) Dyskusyjne jest przyjęcie terminologii medycznej (s.96), gdzie wynik pozytywny oznacza wykrycie symptomu stanu chorobowego. Konwencja stosowana w diagnostyce technicznej jest odwrotna.
- f) Na stronie 17 diagnostyka uszkodzeń tłumaczona jest jako fault detection, co nie jest właściwe. Określenie fault detection oznacza detekcję uszkodzeń.
- g) Na str. 50 zbiór atrybutów transakcji I powinien zawierać pięć elementów - brak 5.
- h) Tylko jeden z trzech głównych rozdziałów pracy, zawierających oryginalne wyniki badań kończy się wnioskami (R.4.6). Szkoda, że brak takiego punktu w rozdziałach 3 i 5.

6. Podsumowanie

Praca lokuje się w dyscyplinie naukowej informatyka, ale wiele jej wątków związanych jest także z dyscyplinami: automatyka oraz budowa i eksploatacja maszyn.

Podniesione wyżej drobne uwagi krytyczne i dyskusyjne nie wpływają na ogólną bardzo pozytywną ocenę pracy, zawierającej bardzo wartościowy materiał badawczy oraz wiele oryginalnych osiągnięć naukowych. Poziom użyteczności praktycznej uzyskanych wyników zdecydowanie wykracza ponad poziom przeciętny. Autor wykazał umiejętność rozwiązywania trudnych problemów badawczych, a także bardzo dobrą znajomość metod sztucznej inteligencji i teorii diagnostyki maszyn. O wysokich kompetencjach Autora świadczą zarówno oryginalne elementy pracy jak też odwołania do literatury światowej.

W związku z powyższym stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska pana mgr. inż. Tomasza Mączki spełnia wszystkie wymagania stosownej ustawy o tytułach i stopniach naukowych. Wnoszę zatem o przyjęcie opiniowanej rozprawy oraz jej dopuszczenie do publicznej obrony przez Radę Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej.

