Prof. dr hab. inż. Józef Gawlik, prof. zw. PK
Politechnika Krakowska
Katedra Inżynierii Procesów Produkcyjnych

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA w Gliwicach

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Kuchta, nt.: **„Zastosowanie sztucznych systemów immunologicznych w wybranych zadaniach diagnostycznych"**

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Andrzej Sokołowski, prof. Pol. Śl.

Podstawa opracowania: zlecenie dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego nr RMT0-21/D006/11/12 z dnia 13.10.2011 r.

1. Zakres i sformułowanie tematu rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera w części zasadniczej 134 strony plus 4 strony wykazu bibliografii (47 pozycji) oraz 2 strony streszczenia w j. polskim i w j. angielskim. Praca składa się z ośmiu rozdziałów.

We wstępie Autorka rozprawy krótko scharakteryzowała rolę sztucznych systemów immunologicznych (SSI) w zautomatyzowanych układach obróbkowych.

Komentarza i wyjaśnienia wymaga stwierdzenie Doktorantki że *„ze względu na małą wiedzę na temat materiałów narzędziowych i konstrukcyjnych, proces skrawania a w szczególności zużycie ostrza stały się mniej przewidywalne"*. Akapit (str.6)zaczynający się od słów *„W celu zapewnienia szybkości ..."* jest stylistycznie błędny, a przez to niejasny w treści. Także stwierdzenie, że SSI *„... są metaforą biologicznego układu..."* jest moim zdaniem niezbyt trafne, bowiem *metafora* to inaczej „przenośnia, która może być bogatsza w treści od obiektu, do którego się odnosi. Natomiast SSI są uproszczonym modelem sytemu biologicznego. *Warto by też we wstępie dać zestawienie stosowanych skrótów i ich objaśnień.*

Rozdział 2 – przegląd literatury zawiera analizę systemu odpornościowego człowieka i wybranych zastosowań *„...wzorowanych na jego mechanizmach"*. W tym stwierdzeniu Doktorantka potwierdza, że SSI jest właśnie uproszczonym modelem układu biologicznego.

W początkowej fazie analizy literatury Doktoranta wprowadza podstawowe pojęcia z zakresu biologicznych systemów immunologicznych, które są potem wykorzystywane w dalszej części pracy. Szczególnie interesujący, z punktu widzenia możliwości zastosowań technicznych, jest układ odpornościowy, będący rozproszonym systemem przetwarzania informacji i mającym zdolność uczenia się oraz dostosowywania do zmiennego otoczenia (jego cechy to: rozproszona i progowa detekcja, detekcja anomalii, adaptacyjność, samoorganizacja, prosta reprezentacja wiedzy przez detektory, unikalność). Nabyta odporność immunologiczna charakteryzuje się szereg cech, jak np.: rozpoznawanie antygenu, aktywacja limfocytów, eliminacja antygenów, zapamiętywanie, które to cechy mogą być wykorzystane do rozpoznawania i ewentualnego korygowania stanu systemów technicznych. Zaś takie właściwości jak unikalność i pamięć dają podstawę do stosowania sztucznych systemów immunologicznych w technicznych układach ze „sztuczną inteligencją".

Sztuczne systemy immunologiczne są znacznym uproszczeniem złożonych, naturalnych układów odpornościowych i dlatego są one tworzone na bazie wybranych cech i mechanizmów systemu odpornościowego. Główne zastosowania SSI sprowadzają się najczęściej do rozwiązywania problemów:

- optymalizacji: funkcji numerycznych, kombinatorycznej, układów robotyki i sterowania;
- detekcji: anomalii, wirusów, ochrony komputerów;
- klasyfikacji: dot. grupowania, systemów uczących się, systemów bioinformatycznych, przetwarzania – rozpoznawania obrazów, układów sieciowych (sieci odkryć).

Autorka rozprawy przedstawia szereg dotychczasowych zastosowań sztucznych systemów immunologicznych, prezentowanych w literaturze, jak np.: optymalizację funkcji wielomodalnych, funkcji niestacjonarnych, wyznaczanie wielkości partii produkcji, sterowanie robotem, detekcji wirusów komputerowych, detekcji błędów lotu samolotu, monitorowanie

zużycia narzędzia podczas frezowania, systemu rozpoznawania obrazów, systemu klasyfikacji E-mail, klasyfikacji dokumentów, połączenia SSI z sieciami neuronowymi (sieciami RBF, sieciami ze wsteczną propagacją błędów) oraz systemów z logiką rozmytą.

Biorąc pod uwagę przedstawioną analizę stanu wiedzy nt. możliwości zastosowań sztucznych systemów immunologicznych **wybór tematu rozprawy uznaję za trafny z poznawczego punktu widzenia oraz potencjalnych jego zastosowań w złożonych systemach technicznych.**

Na podstawie tej części rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Pani mgr inż. Małgorzata Kuchta opanowała na wysokim poziomie umiejętność systematycznej analizy złożonego problemu badawczego o charakterze interdyscyplinarnym.

W rozdziale 3 Autorka rozprawy określiła **cel i zakres pracy.** Celem nadrzędnym jest analiza i jednocześnie weryfikacja możliwości zastosowania SSI do optymalizacji, klasyfikacji oraz detekcji anomalii. Tak sformułowany cel sugeruje, że oprócz analizy (co nie budzi wątpliwości) nastąpi także weryfikacja możliwości zastosowania SSI do optymalizacji anomalii. *Nasuwa się zatem pytanie, czy i ze względu na jakie kryterium jest sens optymalizować anomalie?*

Sprecyzowane trzy cele szczegółowe nie budzą zastrzeżeń, natomiast świadczą o dobrym przygotowaniu merytorycznym Doktorantki do podjęcia zaproponowanego tematu rozprawy.

Przedstawiając zakres pracy Autorka rozprawy zwięźle objaśnia merytoryczną zawartość poszczególnych rozdziałów.

Zwracam uwagę, że omawiając rozdział siódmy dot. identyfikacji anomalii w szeregach czasowych, w zdaniu: „Analizowano również wpływ wielkości anomalii", należy użyć sformułowania „wpływ wartości anomalii" (pojęcie „wielkość" ma inny zakres znaczeniowy, np. wielkość fizyczna jako pewna cecha, a nie wartość liczbowa).

W rozdziale 4 zostały przedstawione cztery algorytmy zastosowane do rozwiązywania zadań podjętych w opiniowanej pracy doktorskiej.

Należy do nich jest algorytm CLONALG (CLONal selection ALGorithm – rys.4.1) bazujący na:

- selekcji i klonowaniu najbardziej stymulowanych przeciwciał;
- śmierci niestymulowanych przeciwciał, co odpowiada pominięciu rozwiązań o malej wartości funkcji celu;
- dojrzewaniu swoistości (hipermutacji);
- ponownej selekcji klonów, selekcji proporcjonalnej do ich dopasowania z antygenem;
- powstawaniu i utrzymaniu zróżnicowania w celu wyjścia z optimum lokalnego.

W tym przypadku antygen reprezentuje ocenę problemu inżynierskiego (wartość funkcji celu). Dopasowanie poszczególnych przeciwciał jest definiowane za pomocą odległości Hamminga (wzór 4.1).

Algorytm CLONALG po odpowiedniej modyfikacji (rys.4.2) może być zastosowany do rozwiązywania zadań optymalizacji.

Drugim z zaproponowanych algorytmów jest system klasyfikujący oparty na algorytmie RIais, którego istotą jest:

- zastosowanie sieci B komórek do utworzenia pamięci immunologicznej;
- klonowanie i mutacja B komórek B komórki żyją kilka dni i po zwalczeniu infekcji są usuwane z organizmu) pod wpływem stymulacji pochodzącej od prezentowanych antygenów i sąsiednich komórek sieci;
- usuwanie nieefektywnych komórek.

Miarą dopasowania dwóch komórek, reprezentowanych przez liczby rzeczywiste, jest odległość euklidesowa (wzór 4.3). Parametrami systemu są: liczba iteracji określająca ile razy prezentowane będą dane trenujące oraz parametr NAT reprezentujący stopień dopasowania sieci, tj. zadaną wartość progową. Algorytm eksploracyjnej analizy danych jest szczegółowo opisany w pracy, a jego schemat jest przedstawiony na rys.4.3. Efektem realizacji algorytmu jest tworzenie komórek pamięci, które są wykorzystywane do klasyfikacji (rys.4.4.).

Trzecim algorytmem jest system klasyfikujący oparty na algorytmie aiNet (rys.4.5), stosujący mechanizmy algorytmu RIais oraz uwzględniający dojrzewanie swoistości. Służy on do budowy pamięci immunologicznej. W celu zmniejszenia liczby podobnych do siebie klonów jest obliczane wzajemne ich dopasowanie (wzory 4.11 ÷ 4.12), a następnie usuwane są klony, których odległość od innych nie przekracza pewnej zadanej wartości (rys.4.6). Dodatkowym ograniczeniem jest przyjęta maksymalna liczba elementów pamięci. Klasyfikacja jest dokonywana wg algorytmu – rys.4.7.

Czwartym z zaproponowanych algorytmów jest algorytm negatywnej selekcji, bazujący na zachowaniu się limfocytów typu T, które odpowiadają za odróżnianie molekuł własnych od obcych, zagrażających organizmowi. Algorytm negatywnej selekcji obejmuje kilka głównych kroków (rys.4.9), tj.:

- utworzenie zbioru reprezentującego własne epitopy (fragmenty antygenu łączące się bezpośrednio z przeciwciałem). Zbiór ten może reprezentować wyniki pomiarów charakteryzujących poprawny stan systemu (urządzenia lub procesu);
- utworzenie zbioru losowo wygenerowanych receptorów;
- utworzenie zbioru receptorów, które nie rozpoznają żadnego elementu, charakteryzującego poprawny stan systemu;
- monitorowanie zbioru, którego stanami są łańcuchy reprezentujące aktualny stan systemu i dla którego utworzono zbiór receptorów.

Celem detekcji anomalii jest więc sprawdzenie, czy dany epitop jest nadal prawidłowy, czy też został zainfekowany (wówczas nastąpiło przekroczenie zadanej wartości progowej), co objawia się modyfikacją łańcucha reprezentującego aktualny stan monitorowanego systemu.

Reprezentacja danych dotyczących stanu procesu jest zapisywana w postaci binarnej (przykłady kodowania: rys.4.10 – rys.4.14), a prawdopodobieństwo rozpoznania wybranego łańcucha przez receptor określa wzór 4.16. Zbiór receptorów jest generowany losowo. Liczba receptorów jest zależna od długości wektora wejściowego (rys.4.15).

Charakterystyka poszczególnych algorytmów została przedstawiona zwięźle, a równocześnie przejrzyście, co potwierdza dobre przygotowanie Autorki rozprawy do analizy i syntezy zagadnień dotyczących analizy stanu złożonych systemów technicznych.

Rozdział 5 zawiera przykłady zadań optymalizacyjnych opracowane przez Doktorantkę. Skuteczność algorytmu CLONALG została przetestowana na przykładzie optymalizacji czterech funkcji wielomodalnych (rys.5.1 oraz wzory 5.1 ÷ 5.4). W analizowanych przykładach algorytm znajdował optima globalne po liczbie do 100 iteracji. Interesujące są wyniki badań wpływu parametrów algorytmu na wartość najlepiej dopasowanego klonu (odpowiada to znalezionemu maksimum funkcji) oraz na średnią wartość dopasowania sieci. Wpływ parametrów, tj.: współczynnika klonowania β, rozmiaru zbioru antygenów od 1 do 100 elementów, współczynnika hipermutacji oraz udziału procentowego (liczby) losowo wygenerowanych klonów na średnie dopasowanie sieci komórek pamięci immunologicznej został przedstawiony na rys.5.4. Wynika z niego, że im większa wartość współczynnika hipermutacji oraz współczynnika β tym szybciej komórki pamięci zbliżają się do maksimum oraz szybciej rośnie średnie dopasowanie sieci, a także im większy jest udział procentowy losowo wygenerowanych klonów tym większa jest wartość średniego dopasowania sieci.

Nasuwa się pytanie, czy wobec takiego trendu wpływu badanych współczynników na dopasowanie sieci należy poszukiwać maksymalnych wartości tych współczynników, czy też istnieją w tym przypadku pewne ograniczenia odnoszące się do struktury i funkcjonowania sieci?

Należy podkreślić, że algorytm skutecznie rozwiązywał zadanie poszukiwania optimum globalnego, gdyż nie zatrzymywał się na optimach lokalnych, a maksymalna odchyłka wyniku obliczeniowego od maksimum globalnego nie przekraczała 2%.

Interesujące są wyniki zastosowania SSI do wspomagania optymalizacji bazy reguł systemu logiki rozmytej. Funkcjonowanie systemu logiki rozmytej o strukturze Mamdani (FL-M, rys.5.8) zależy od kilku czynników, tj.: sposobu generowania reguł, realizacji operacji

logicznych, rodzaju konkluzji, sposobu przeprowadzenia treningu, liczby wejść do systemu, liczby funkcji przynależności dla wejść, rodzaju funkcji przynależności. Doktorantka poddała analizie i procedurze optymalizacyjnej konkluzje reguł oraz funkcje przynależności wejść i wyjść. Rozważany był system logiki rozmytej FL-M z dwoma wejściami, dla których każdemu z nich przypisano 5 gaussowskich funkcji przynależności (rys.5.9) Do wyjść przypisano trzy gaussowskie funkcje przynależności (rys.5.10). Do wyostrzania zastosowano metodę środka ciężkości. Funkcją kryterium była sprawność klasyfikacji systemu FL. Populacja początkowa składała się z pięciu komórek pamięci. Testowany był wpływ parametrów algorytmu CLONALG (współczynnika klonowania β, współczynnika hipermutacji, liczby losowo wygenerowanych klonów oraz rozmiaru zbioru antygenów – liczby początkowych systemów logiki rozmytej) na sprawność systemu FL. Dane wzorcowe do treningu systemu FL przedstawia rys.5.11.

W następnym cyklu badań Autorka rozprawy poddała analizie i ocenie sposób generowania bazy reguł. Wygenerowana została maksymalna liczba 25 reguł, do których zostały przypisane konkluzje, przekształcone na kod binarny. Połączenie kodów binarnych 25 konkluzji tworzy kod komórki pamięci immunologicznej, z których każda reprezentuje inny system FL, czyli tworzy zbiór konkluzji reguł systemu. Funkcją kryterium jest sprawność systemu, a jej maksimum w świetle badań wynosi 85%. Na rys.5.12 ÷ rys.5.15 zostały przedstawione wyniki sprawności klasyfikacji dla różnych wartości współczynnika hipermutacji, liczby iteracji, wartości współczynnika klonowania β oraz udziału losowych klonów.

Sądzę, że byłoby interesujące przedstawienie tych zależności (w szczególności rys.5.13) w układzie przestrzennym, gdyż wówczas wyraźnie ujawniłby się charakter tych zmian. Analiza przedstawionych wykresów sugeruje, że może to być powierzchnia siodłowa.

W kolejnych etapach badań Doktorantka zaproponowała trzystopniową procedurę optymalizacyjną (rys.5.17) obejmującą: konkluzje reguł, a następnie szerokości oraz położenia środków funkcji przynależności wejść i szerokości oraz położenia środków funkcji przynależności wyjść. Zastosowana procedura optymalizacyjna została zweryfikowana w zadaniu analizy przynależności zbioru punktów do dwóch klas (rys.5.18). Doktorantka stwierdziła, że „... korzystniejszym rozwiązaniem jest optymalizacja jednostopniowa niż trzystopniowa".

Sądzę jednakże, iż przy tak niewielkich różnicach pomiędzy uzyskanymi sprawnościami (0,62% oraz 1,25%) stwierdzenie to nie jest w pełni uprawnione, bowiem brak jest informacji o tym, czy system każdorazowo i z taką samą dokładnością będzie dokonywał klasyfikacji analizowanych zbiorów. W dalszych opracowaniach warto by też rozważyć zastosowanie procedury optymalizacji wielokryterialnej do wyznaczenia wartości parametrów SSI.

Zaproponowany przez Doktorantkę system logiki rozmytej został także zastosowany do klasyfikacji stanu zużycia ostrzy wierteł. Wiertła zostały podzielone na trzy grupy: niezużyte, częściowo zużyte i zużyte. Dane pomiarowe były podzielone na dwa zbiory (każdy o liczności 80): trenujący i testujący. Na wejściu i wyjściu systemu przypisane były gaussowskie funkcje przynależności. Do wyostrzania wyników zastosowano metodę środka ciężkości. Porównanie sprawności systemów klasyfikujących: FL-M (optymalizacja trzystopniowa), FL-M (optymalizacja jednostopniowa) oraz FL o strukturze Takagi-Sugeno przedstawia rys.5.20.

Podobnie przeprowadzone próby zastosowania systemu FL-M do diagnostyki odkształceń termicznych szlifierki (rys.5.23 ÷ rys.5.24) wskazują na możliwość uzyskania pozytywnych efektów ich zastosowania, ale też *wskazują na celowość prowadzenia dalszych badań nad ich rozwojem i udoskonalaniem. Jeśli Pani mgr inż. M. Kuchta będzie w przyszłości zajmowała się diagnostyką odkształceń termicznych obrabiarek (a jest to problem bardzo istotny i równocześnie złożony), to proponuję zapoznanie się także z opracowaniami na ten temat zespołu prof. J. Jędrzejewskiego z Politechniki Wrocławskiej (np. publikacje w: CIRP- Annals, Journal of Machine Engineering, Inżynieria Maszyn).*

Rozdział 6 zawiera testy klasyfikacji z zastosowaniem SSI. Pierwszy etap obejmował testy z zastosowaniem algorytmu RIais do rozpoznawania przynależności do klasy w przypadku różnego kształtu granicy pomiędzy klasami, a także dla przypadków różnego rozmieszczenia punktów reprezentujących daną klasę. Analizie zostały poddane kształty granicy w postaci

okręgu, elipsy, nerki oraz dwóch grup ograniczonych rozłącznymi okręgami (rys.6.1). Przedstawiona, obszerna analiza sprawności klasyfikacji dla różnych wartości parametru NAT i różnej liczby iteracji (przykład rys.6.2, także tab.6.1, i inne) dała podstawę do wyznaczenia zakresów parametru NAT dla osiągnięcia maksymalnych sprawności klasyfikacji (rys.6.10 ÷ rys.6.11) oraz zaproponowania metod doboru wartości parametru NAT (rys.6.13 ÷ rys.6.13). Porównanie sprawności klasyfikacji dla różnych metod (rys.6.14 ÷ rys.6.15) wykazuje, że możliwe jest uzyskanie 100 % sprawności. Porównanie sprawności klasyfikacji (rys.6.16) z zastosowaniem SSI z systemami FL-M potwierdza, że opracowana przez Autorkę rozprawy procedura daje bardzo dobre efekty.

Drugi etap zawiera badania zastosowania SSI do klasyfikacji przy trzech znanych klasach zbiorów oraz jednej nieznanej. Zaproponowany system bazuje na trzech klasyfikatorach immunologicznych. Jest to zatem rozszerzenie możliwości stosowania SSI do zadań klasyfikacji. Dane treningowe w układzie 2D zostały przedstawione rys.6.17, a dla układu 3D na rys.6.19. Doktorantka zaproponowana odpowiednią do tych zadań strukturę systemu klasyfikującego (rys.6.18). Istotnym problemem dla uzyskania wysokiej sprawności klasyfikacji jest wybór parametru NAT, co potwierdzają wyniki zawarte w tab.6.2 i tab.6.3 oraz porównanie tych sprawności dla różnych procedur wyboru tego parametru (rys.6.20). Zwraca uwagę możliwość osiągnięcia wartości sprawności klasyfikacji bliskich 100% dla przypadku klasyfikacji 3D. Autorka rozprawy zwraca uwagę również na ograniczenia w doborze tego parametru podając, że: „... zróżnicowanie wartości NAT można jednak wykorzystać tylko w przypadku klas okrągłych (2D) lub o kształcie kuli (3D)".

Opracowana metoda została przetestowana na przykładzie klasyfikacji stanu wierteł podzielonych na trzy grupy (przykład przedstawiony w rozdz.5). Wydzielony został zbiór danych trenujących (rys.6.22). Na bazie trzech klasyfikatorów immunologicznych został skonstruowany system klasyfikujący trzy stany narzędzia. Uzyskane, maksymalne sprawności klasyfikacji (rys.6.23 i rys.6.24) wynosiły ok. 79%. Doktorantka podjęła próby budowy systemu klasyfikującego, umożliwiającego osiągnięcie wyższych sprawności (rys.6.25 i rys.6.26), bowiem z punktu widzenia praktycznych zastosowań diagnostycznych ważne jest stwierdzenie, w którym momencie należy wycofać narzędzie z eksploatacji, aby nie doprowadzić do jego zużycia katastroficznego (wytrzymałościowego). Badania te doprowadziły do wyboru systemu bazującego na dwóch klasyfikatorach immunologicznych, pozwalającego na uzyskanie sprawności na poziomie nieco powyżej 83% (tab.6.4).

Trzeci etap z zastosowaniem algorytmu aiNet obejmuje analizę wpływu współczynnika tłumienia σ_s (progu supresji) oraz σ_d (progu naturalnej śmierci komórki) na sprawność klasyfikacji (system wg koncepcji – rys.4.4). Rozważane były przypadki różnego rodzaju granicy pomiędzy klasami (okrąg, elipsa, nerka, dwa okręgi) podobnie, jak to miało miejsce z zastosowaniem algorytmu RIais. Wyniki zostały udokumentowane na rys.6.27 ÷ rys.6.33. Maksymalne wartości sprawności klasyfikacji dla różnych zbiorów trenujących dla dobranych parametrów NAT (na podstawie danych weryfikujących) zawierały się w przedziale od ok. 93% do 100% (tab6.6).

I w tym przypadku opracowany system został zastosowany do klasyfikacji stanu wierteł. Porównanie sprawności klasyfikacji uzyskanych dla systemów opartych na algorytmie RIais oraz aiNet (rys.6.34) wskazuje na wyższą sprawność algorytmu RIais, sięgająca ok.82% dla systemu opartego na dwóch klasyfikatorach binarnych.

W podsumowaniu tej części Badań Autorka rozprawy między innymi stwierdza, że: „...w przypadku systemu logiki rozmytej niemożliwe byłoby zbudowanie klasyfikatora bazując na danych reprezentujących tylko jedną klasę, co jest dużym atutem klasyfikatorów opartych na sztucznych systemach immunologicznych". Istotnym zagadnieniem jest wybór wartości parametrów NAT, σ_s oraz σ_d na podstawie oceny sprawności klasyfikacji danych weryfikujących.

Rozdział 7 – detekcja anomalii zawiera analizę wpływu struktury systemu detekcji anomalii oraz wybranych parametrów algorytmu na sprawność wykrywania tych anomalii w szeregach czasowych. W badaniach wstępnych została wybrana funkcja liniowa (parametry symulacji –

tab7.1). Uzyskano 100% detekcję dla każdej symulacji. W kolejnych testach analizowane były przebiegi składające się z 10 punktów z wprowadzonymi anomaliami (rys.7.1) dla różnych układów aktywowanych łańcuchów (rys.7.2 ÷ rys.7.3). i w tym przypadku uzyskano 100% skuteczności detekcji.

Kolejne 10 symulacji zostało przeprowadzonych dla każdej kombinacji parametrów w celu weryfikacji liczebności zbioru receptorów dla różnej liczby identycznych bitów (rys.7.4). Na ich podstawie została wyznaczona liczebność zbioru receptorów umożliwiająca osiągnięcie 100% detekcji łańcuchów z anomaliami (rys.7.5). Zagadnieniem o większej złożoności jest detekcja funkcji matematycznych: sinus oraz logarytmicznej (rys.7.6 ÷ rys.7.8). Podczas detekcji mogą mieć miejsce dwa rodzaje błędów - z niedocenienia (I rodzaju) oraz z przecenienia (II rodzaju). Wykonane testy detekcji anomalii dla różnych warunków (rys.7.9 ÷ rys.7.12) potwierdziły, że istnieje możliwość osiągnięcia 100% trafności detekcji, aczkolwiek wymaga to stosowania dużej liczby identycznych bitów i przedziałów, a to z kolei może znacznie wydłużać czas niezbędny na wykrycie anomalii.

W celu określenia wpływu wielkości anomalii (różnicy pomiędzy wartością przebiegu wzorcowego i monitorowanego) na sprawność jej wykrywania zostały przeprowadzone testy funkcji logarytmicznej. Dobór parametrów (szerokości okna, liczby przedziałów, liczby identycznych bitów) algorytmu (rys.7.13 ÷ rys.7.14 oraz tab.7.4) związany jest z wpływem czułości systemu na poziom zakłóceń. Ważne jest ustalenie przez użytkownika progu anomalii, którego przekroczenie powoduje identyfikację tejże anomalii. Jest to dość trudne zadanie z uwagi na brak możliwości dobrania szerokości przedziału tak, aby ściśle odpowiadała ona progowej wartości anomalii.

Złożonym przebiegiem, który został poddany testom była funkcja poliharmoniczna (rys.7.16). Na podstawie przeprowadzonych symulacji Doktorantka wykazała, że poprawna identyfikacja anomalii jest możliwa w sytuacji, gdy liczba identycznych bitów wynosi ⅔ długości łańcucha zawierającego anomalie.

Weryfikacja praktycznego zastosowania algorytmu negatywnej selekcji w diagnostyce technicznej została przeprowadzona na przykładzie badań cieplnych sterowanej numerycznie osi posuwu (rys.7.17). Rozpatrywany był przyrost temperatury, a nie jej wartości bezwzględne. Złożoność tego zadania diagnostycznego wynika z wpływu kinematycznych warunków prowadzenia badań na przyrosty temperatury. Dlatego też Autorka rozprawy zaproponowała aby w badaniach przetestować:

- klasyczny algorytm negatywnej selekcji;
- algorytm negatywnej selekcji z normalizacją przebiegów do przedziału [0 1];
- algorytm negatywnej selekcji dla podrealizacji nie dłuższych, niż długość przedziału wzorcowego;
- algorytm negatywnej selekcji dla znormalizowanych podrealiazacji.

Parametry, dla których osiągnięto poprawną detekcję anomalii dla poszczególnych przypadków zostały zestawione odpowiednio w tab.7.9 ÷ tab.7.12, zaś liczbę błędów dla wyszczególnionej liczby przedziałów odpowiednio na rys.7.22 ÷ rys.7.23 oraz na rys.7.26 ÷ rys.rys.7.27. Syntetyczny algorytm detekcji anomalii w badaniach przyrostu temperatury przedstawia rys.7.28. Wyniki tych badań wskazują, że decydujący wpływ na uzyskanie zadowalających efektów identyfikacji anomalii (wyeliminowanie popełniania błędów II rodzaju) ma wybór przebiegu wzorcowego i parametry jego rejestracji.

W przypadku detekcji anomalii w sygnale drgań istotnym parametrem jest próg anomalii. Analiza błędu bezwzględnego pomiędzy przebiegiem określonym na podstawie matematycznego modelu a przebiegiem zarejestrowanym (rys.7.33) wskazuje, że nie występowały błędy I rodzaju. Liczba błędów II rodzaju była zależna od zakresu danych trenujących, które można zawęzić do 1 okresu analizowanego sygnału.

Rozprawę zamyka **rozdział 8 – podsumowanie**, w którym Doktorantka wskazuje na efekty przeprowadzonych badań i możliwości ich praktycznych zastosowań jako efektywnej alternatywy w odniesieniu do innych metod sztucznej inteligencji.

Ocena metodycznej koncepcji pracy

W opiniowanej rozprawy doktorskiej dają się wyróżnić następujące, główne obszary:

- analizę stanu wiedzy z zakresu budowy i funkcjonowania systemu immunologicznego człowieka;
- charakterystykę dotychczasowych zastosowań sztucznych systemów immunologicznych w procedurze optymalizacyjnej, robotyce i innych wybranych zagadnieniach technicznych;
- analizę systemów i algorytmów stosowanych w zadaniach klasyfikacji zbiorów, optymalizacji i diagnostyce;
- opracowanie i weryfikację algorytmicznych procedur systemów klasyfikujących i identyfikujących występujące odchylenia (anomalie) od przyjętych, wzorcowych przebiegów;
- opracowanie przykładów zastosowań sztucznych systemów immunologicznych w diagnostyce technicznej.

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i sposobu rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam w pełni pozytywnie,** albowiem zawiera ona teoretyczną analizę złożonych, interdyscyplinarnych problemów diagnostycznych, opracowanie i zweryfikowanie niezbędnych algorytmów oraz zaleceń stosowania zaproponowanych metod.

Za oryginalny i ważny pod względem naukowym oraz utylitarnym wkład Doktorantki w rozwiązanie postawionego problemu badawczego uznaję:

- usystematyzowanie i twórcze wykorzystanie wiedzy z zakresu funkcjonowania naturalnych systemów immunologicznych;
- opracowanie własnych, oryginalnych algorytmów bazujących na sztucznych systemach immunologicznych i ich zastosowanie do diagnostyki odchyleń (anomalii) w systemach technicznych.

Podsumowując całość rozprawy doktorskiej stwierdzam, że **zadanie badawcze, które podjęła Doktorantka stanowi istotne wzbogacenie wiedzy z zakresu rozwoju i zastosowań metod sztucznej inteligencji w systemach technicznych. Wyniki badań wskazują na możliwości zastosowania proponowanych metod diagnostycznych w budowie i eksploatacji maszyn oraz automatyce i robotyce.**

2. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Opiniowana praca doktorska należy do ważnego obszaru badawczego, związanego z zastosowaniami metod sztucznej inteligencji w technice i technologii (w szczególności w technologii mechanicznej).

Doktorantka wykazała że osiągnęła wysoki poziom umiejętności analizy i syntezy złożonych problemów naukowych, systematyzacji wiedzy na potrzeby rozwiązań teoretycznych i technicznych. Wykazała też, że możliwe jest praktyczne zastosowanie opracowanych procedur diagnostycznych. Pani mgr inż. Małgorzata Kuchta opanowała nowoczesne metody i narzędzia badawcze, niezbędne do prowadzenia prac naukowych oraz rozwiązywania złożonych problemów naukowych i technicznych. **Rozprawę doktorską zaliczam do wyróżniających się opracowań.** Nieliczne uchybienia edycyjne zaznaczyłem w tekście i przekazałem Autorce.

Opiniowana rozprawa doktorska posiada oryginalne cechy nowości i walory utylitarne. Na podstawie powyższych stwierdzeń wyrażam opinię, że rozprawa doktorska mgr inż. Małgorzaty Kuchta nt.: „Zastosowanie sztucznych systemów immunologicznych w wybranych zadaniach diagnostycznych" spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki *(Dz. U. nr 65, Poz. 595, z dnia 14.03.2003 r.)* **i wnoszę o dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.**

Kraków, dnia 03 stycznia 2012 r.