Gawlik Józef
Kiełbus Anna
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacja Produkcji, Katedra Inżynierii Procesów Produkcyjnych, Politechnika Krakowska

ZASTOSOWANIA METOD SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W NADZOROWANIU URZĄDZEŃ TECHNOLOGICZNYCH I JAKOŚCI WYROBÓW

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SUPERVISING THE TECHNOLOGICAL EQUIPMENTS AND QUALITY OF PRODUCTS

Słowa kluczowe: nadzorowanie, jakość wyrobów, sztuczna inteligencja
Keywords: supervising, quality of products, artificial intelligence

Streszczenie: Spełnianie jakościowych wymagań rynku jest koniecznością dla konkurujących przedsiębiorstw. Wymaga ono korzystania z nowoczesnych metod i narzędzi do analizy rynków, procesów, jakości wyrobów, przyczyn niezgodności, oceny innowacyjności. Zarządzanie produkcją obejmuje wiele przedsięwzięć technicznych, technologicznych i organizacyjnych. O jakości technologicznej i użytkowej wyrobów w głównej mierze decydują warunki realizacji procesu. Możliwość ujęcia wpływu szeregu czynników o charakterze jakościowym i ilościowym daje zastosowanie metod sztucznej inteligencji i teorii zbiorów rozmytych do sterowania procesem produkcyjnym. Prowadzone są badania nad rozwojem inteligentnych systemów bezpośredniej komunikacji głosowej operatora z maszyną technologiczną. Otwierają one nowe możliwości nadzorowania maszyn i urządzeń technologicznych oraz sterowania jakością wyrobów.

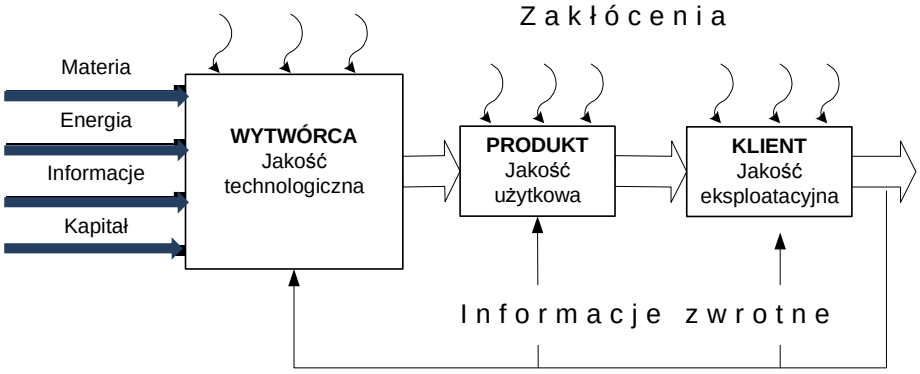
Abstract: Fulfilling quality requirements of the market is a necessity for competing companies. It requires the use of modern methods and tools for the analysis of markets, processes, product quality, the causes of nonconformities, evaluating innovation. Production management includes a lot of technical, technological and organizational undertaking. The quality of the technological and functional of products primarily decided on the conditions of the process. Possibility of recognition of the impact of various factors of qualitative and quantitative characteristic can use of methods of artificial intelligence and fuzzy set theory to control the production process. Research is underway on the development of intelligent systems to the directly communicate with the machine and operator's with voice technology help. They open new possibilities for monitoring of machines and technological equipment and quality control of products.

1) Wprowadzenie

Realizacja procesów wytwarzania następuje za pośrednictwem systemów produkcyjnych. **System produkcyjny** jest celowo zaprojektowanym i zorganizowanym układem, w którym na wejściu występują: materia, energia informacja i kapitał, służącym do wytwarzania określonych wyrobów. Obejmuje on pięć podstawowych elementów [5]:

1. **wektor wejścia X,** w którego skład wchodzą czynniki produkcji;
2. **wektor wyjścia Y**, obejmujący wyroby, usługi oraz odpady produkcyjne, z których co najmniej część powinna podlegać utylizacji dla ochrony środowiska;
3. **procesy przetwarzania X→Y** określane mianem procesów produkcyjnych;
4. **procesy zarządzania** systemem produkcyjnym;
5. **sprzężenia materialne, energetyczne i informacyjne** pomiędzy wymienionymi, składowymi elementami systemu produkcyjnego.

W systemie wytwórczym są realizowane procesy technologiczne, w których wyniku wyrób osiąga w kolejnych operacjach technologicznych wymaganą **jakość technologiczną**. W wyrobach o złożonej konstrukcji istotną rolę odgrywają procesy montażowe. Ich realizacja prowadzi do ukształtowania złożonego wyrobu (maszyny, urządzenia technologicznego itp.) o określonej **jakości użytkowej.** Wyrób przekazany do klienta jest eksploatowany w różnorodnych warunkach i wówczas ujawnia się jego **jakość eksploatacyjna.** Informacje zwrotne od klienta (w tym także od serwisantów) do wytwórcy powinny być wykorzystywane do wprowadzania koniecznych udoskonaleń wyrobu dla poprawy jakości technologicznej oraz użytkowej, a w efekcie i eksploatacyjnej (rys. 1).



Rys. 1. Jakość wyrobów w procesie wytwarzania i eksploatacji.
Źródło: opracowanie własne.

Wymagania stawiane systemom wytwórczym ewoluowały wraz z rozwojem wiedzy i technicznych możliwości ich realizacji. Znaczący i dynamiczny rozwój systemów wytwórczych następuje wraz z rozwojem automatyzacji i technologii informacyjnych. Dzięki temu mogą być wytwarzane wyroby pojedyncze lub w krótkich seriach na indywidualne zamówienia odbiorców (np. produkcja samochodów z wyposażeniem dostosowanym do wymagań klienta), przy spełnieniu stawianych wymagań jakościowych. Ważną rolę w inżynierii produkcji i zapewnieniu jakości odgrywają metody sztucznej inteligencji [14].

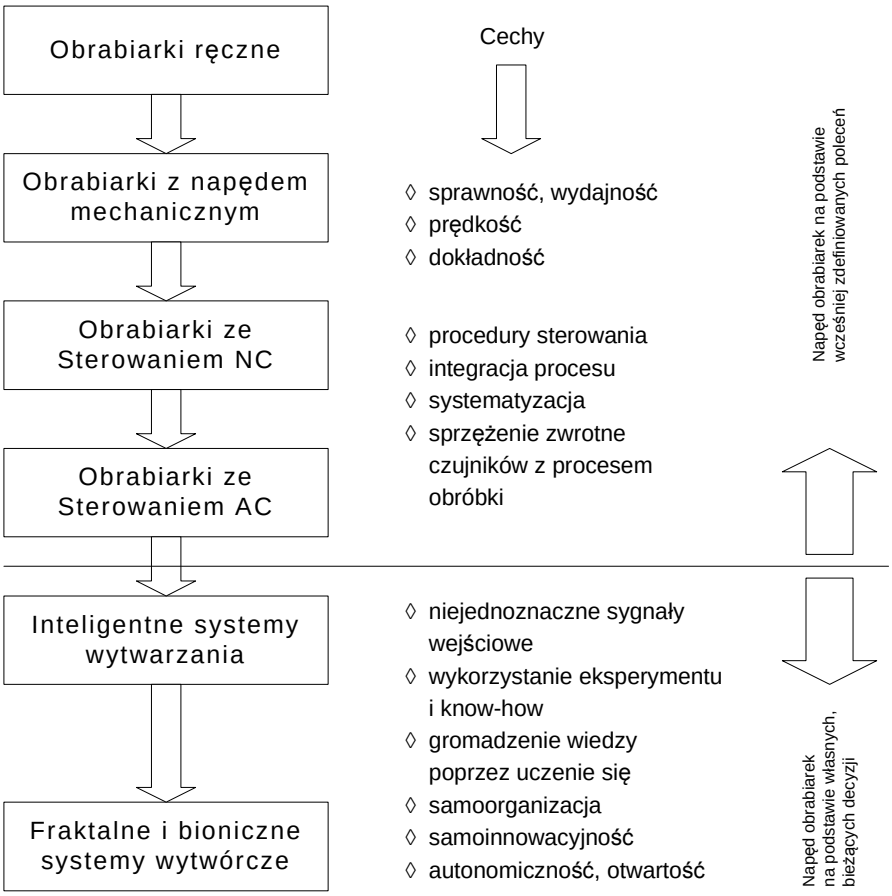
2) Rozwój systemów wytwórczych

Pierwszym krokiem w rozwoju systemów wytwarzania jest pojawienie się maszyn z napędem mechanicznym, które umożliwiały osiąganie wyższych dokładności obróbki. Znaczące etapy ewolucji systemów wytwórczych były związane z rozwojem układów mikroelektronicznych i zastosowaniem numerycznego sterowania (rys.2).

Aktualnie rozwój systemów wytwórczych podąża w kierunku **inteligentnych systemów produkcyjnych** (Inteligent Manufacturing System – IMS) [1]. Inteligentny system produkcyjny jest systemem, w którym w dużej mierze ergotransformacyjność (sterowanie przez człowieka) zostaje zastąpiona maszynowym przetwarzaniem danych, wykorzystującym technologie informacyjne, bazujące na metodach sztucznej inteligencji. Do tego typu systemów produkcyjnych należą: rekonfigurowalne systemy produkcyjne, organizacje fraktalne, biologiczne (bioniczne), holoniczne, holograficzne i hipertekstowe.

Rekonfigurowalne systemy produkcyjne (Reconfigurable Manufacturing Systems – RMS) są to systemy umożliwiające dokonywanie szybkich zmian w ich strukturze w celu dostosowania, w odpowiedzi na zmiany rynkowe, do wytwarzania założonej grupy wyrobów i wielkości produkcji. Rekonfigurowalność systemu produkcyjnego polega na możliwości dostosowania się do zmiennych zadań produkcyjnych, a więc łatwą i szybką zamienność jednostek funkcjonalnych w celu skonfigurowania poszczególnych maszyn technologicznych i całego systemu. Idealne rekonfigurowane systemy produkcyjne charakteryzują się sześcioma cechami: modułowością, integralnością, dostosowaną elastycznością, skalowalnością, wymienialnością i diagnozowaniem. Umożliwiają one szybkie przystosowanie się systemu do takich zakłóceń, jak nagła zmiana wymagań rynku, niespodziewane awarie maszyn. Rekonfigurowalny system ułatwia szybkie rozpoczęcie produkcji nowych wyrobów i dostosowanie ich ilości do aktualnego popytu, a więc dostosowanie

jego zdolności produkcyjnych do ekonomicznego wytwarzania wyrobów w wymaganym czasie [19].



Rys. 2. Rozwój maszyn i urządzeń technologicznych.
Źródło: opracowanie własne

Organizacja fraktalna (Fractal Organization) jest nową koncepcją struktury współpracy wydzielonych jednostek, umożliwiającą zastąpienie pionowych, zhierarchizowanych struktur organizacyjnych w przedsiębiorstwie [16]. Pojęcie *fraktal* (łac. fractus – złamany, pęknięty) pochodzi od matematyczno-geometrycznego określenia struktur naturalnych organizmów żywych i materii. Fraktale są elementami pewnej całości, odwzorowującymi jej strukturę. Obiekty fraktalne mają następujące właściwości:

- są samopodobne na każdym poziomie obserwacji, w tym sensie, że po wyjęciu z nich dowolnej małej części i jej powiększeniu powstanie obiekt wiernie naśladujący całość,
- nie posiadają unikalnej, charakterystycznej w ich przypadku skali długości, gdyż powiększone lub pomniejszone nie zmieniają swych kształtów,
- część jest równoważna całości, układ mikro odzwierciedla układ makro oraz inne układy mikro,
- obiekty fraktalne można powiększać w nieskończoność.

Na płaszczyźnie organizacyjnej, fraktal to samodzielna jednostka, której cele i wydajność mogą być jednoznacznie opisane. Fraktalem może być przedsiębiorstwo (makrofraktal), jak i jego część (mikrofraktal). Zastosowanie tego pojęcia w odniesieniu do przedsiębiorstw podkreśla samopodobieństwo organizacji i jej poszczególnych podsystemów. Obiekty fraktalne takiego przedsiębiorstwa, tj.: obszary, zespoły, pracownicy, są samodzielnymi odpowiedzialnymi jednostkami, które realizują cele przedsiębiorstwa oraz przedsiębiorcze, innowacyjne myślenie i działanie. Koncepcja organizacji fraktalnej jest próbą odpowiedzi na rosnącą złożoność wewnętrznych i zewnętrznych warunków funkcjonowania przedsiębiorstw.

Organizacja biologiczna (Biological Manufacturing System, Bionic Manufacturing System - BMS) daje możliwość tworzenia dynamicznych systemów produkcyjnych, zdolnych do szybkiego reagowania na zmiany zachodzące w środowisku zewnętrznym i wewnętrznym. System produkcyjny jest postrzegany jako zbiorowość niezależnych komórek produkcyjnych, wykorzystujących kod genetyczny i informacje płynące z otoczenia. Podstawą funkcjonowania organizacji biologicznej jest system informacyjny podobny do struktury DNA oraz informacje indywidualne (BN), nabywane przez przedmiot (system) w ciągu całego życia. Informacje w typie DNA i BN są przechowywane w niezależnych, dostępnych systemach. Takie rozwiązanie powoduje, że w organizacjach biologicznych rezygnuje się z centralnego planowania i administracji, a w zamian są określane klasy hierarchiczne obiektów tzw. „modelony", za których pomocą jest możliwe strukturalizowanie organizacji biologicznej.

Przepływ informacji, jej kodowanie oraz zastosowanie algorytmów ewolucyjnych do optymalizacji celów umożliwia oraz znacznie przyśpiesza proces adoptowania się systemów do zmieniających się warunków funkcjonowania. Umiejętność dostosowania się organizacji biologicznych do zmian w otoczeniu przejawia się przez: planowanie dynamiczne; samoorganizację układu jednostek systemu; adaptację do wymagań wobec produktu; adaptację do zmian produkcji; tworzenie adaptacyjnych sieci wielopoziomowych. Koncepcja

BMS, przenosząc biologiczne odniesienia i mechanizmy działania na systemy produkcyjne, koncentruje się głównie wokół procesów adaptacyjnych przedsiębiorstwa.

Organizacja holoniczna (Holonic Manufacturing System – HMS) zakłada odejście od dużych, hierarchicznych organizacji na rzecz małych, zdecentralizowanych jednostek, skupiających jedynie kompetencje kluczowe [21]. Jednostki te, podobnie jak w organizacjach fraktalnych, określane jako **holony** (z greckiego: *holos* – całość i *on* – część), odzwierciedlają strukturę całości, nie tracąc przy tym samodzielności i niezależności operacyjnej. Holony to autonomiczne i kooperujące bloki systemów produkcyjnych służące do przekształcania, transportowania, gromadzenia informacji lub obiektów fizycznych. Holony funkcjonują jako: niezależne całości, którym są podporządkowane części składowe; zależne części, podporządkowane wyższym poziomom i celom; części skoordynowane z ich lokalnym środowiskiem. Każdy holon może działać niezależnie, lub być częścią innego holonu bądź większej całości, określanej jako **holarchy**. Holarchy są grupą holonów, kooperujących ze sobą, aby osiągnąć wspólne cele. Holarchy tworzą wyższy poziom organizacyjny, monitorując i wspierając działania poszczególnych holonów.

Organizacja holoniczna utworzona na bazie holonów i holarchów jest elastycznym układem powiązań między wyodrębnionymi jednostkami. Umożliwia ona, dzięki ciągłemu procesowi reorganizacji i fluktuacji, szybkie i sprawne dostosowywanie się do zmiennych warunków wewnętrznych i zewnętrznych. Zasadniczym celem organizacji holonicznej jest rozwój technologii numerycznej oraz projektowanie, wdrażanie i stosowanie systemów HMS w praktyce przemysłowej, natomiast inne korzyści są niejako uzyskiwane dodatkowo.

Organizacja holograficzna (Hologram Organization, Holomonic Organization) powinna posiadać najistotniejsze zdolności właściwe mózgowi, a więc możliwość konstruowania wzorców oraz powiązań między podobnymi częściami tworzącymi system, zdolnymi do uogólnionych i wyspecjalizowanych działań oraz do reorganizowania swoich wewnętrznych struktur i funkcji. Organizacja holograficzna jest blisko skorelowana z organizacja fraktalną, ponieważ każda jej część zawiera obraz całości ze zmniejszonym stopniem szczegółowości, a zatem może funkcjonować samodzielnie. Podstawą organizacji holograficznej są cztery zasady:

- nadmiarowość (redundancja) części pokazująca, w jaki sposób wbudować całość w część;
- różnorodność, określająca jak wiele z całości trzeba wbudować w część;
- minimum specyfikacji, umożliwiającej zwiększenie samoorganizacji;

- nabywanie wiedzy odnośnie do sposobu uczenia się.

Zastosowanie koncepcji organizacji holograficznej umożliwia uzyskanie korzyści, takich jak: efektywność i adaptacyjność, pożądane wymiary organizacji (np. wyrazistość struktur), większy stopień organizacyjnego uczenia się i autonomii, ułatwione wdrażanie nowych rozwiązań z obszaru technologii informacyjnych.

Organizacja hipertekstowa powstała w wyniku syntezy dwóch modeli organizacyjnych: nowoczesnego, zakładającego elastyczność działania oraz orientację na klienta oraz biurokratycznego, zapewniającego przejrzystą strukturę oraz stabilność. Umożliwia dostosowanie się do zmieniającego się otoczenia, elastyczne reagowanie na potrzeby rynku, uzyskanie przejrzystej struktury przedsiębiorstwa oraz zapewnienie pracownikom przejrzystej ścieżki kariery [21]. Organizację hipertekstową charakteryzują: samoorganizująca się struktura; stałe i efektywne kreowanie wiedzy; praca zespołowa przy uwzględnieniu formalnej struktury hierarchicznej; komplementarność zarządzania przez cele.

Organizacja hipertekstowa ma na celu możliwie efektywne wykorzystanie umiejętności, doświadczenia i kapitału intelektualnego pracowników. Organizacja hipertekstowa posiada również zdolność absorpcji wiedzy z zewnątrz. Jest systemem otwartym, którego wiedza pozostaje w stałej i dynamicznej interakcji, umożliwiającej jej dalszy rozwój. Jest strukturą organizacyjną przedsiębiorstwa przyszłości – przedsiębiorstwa uczącego się.

3) Nadzorowanie systemów wytwarzania w technologii mechanicznej

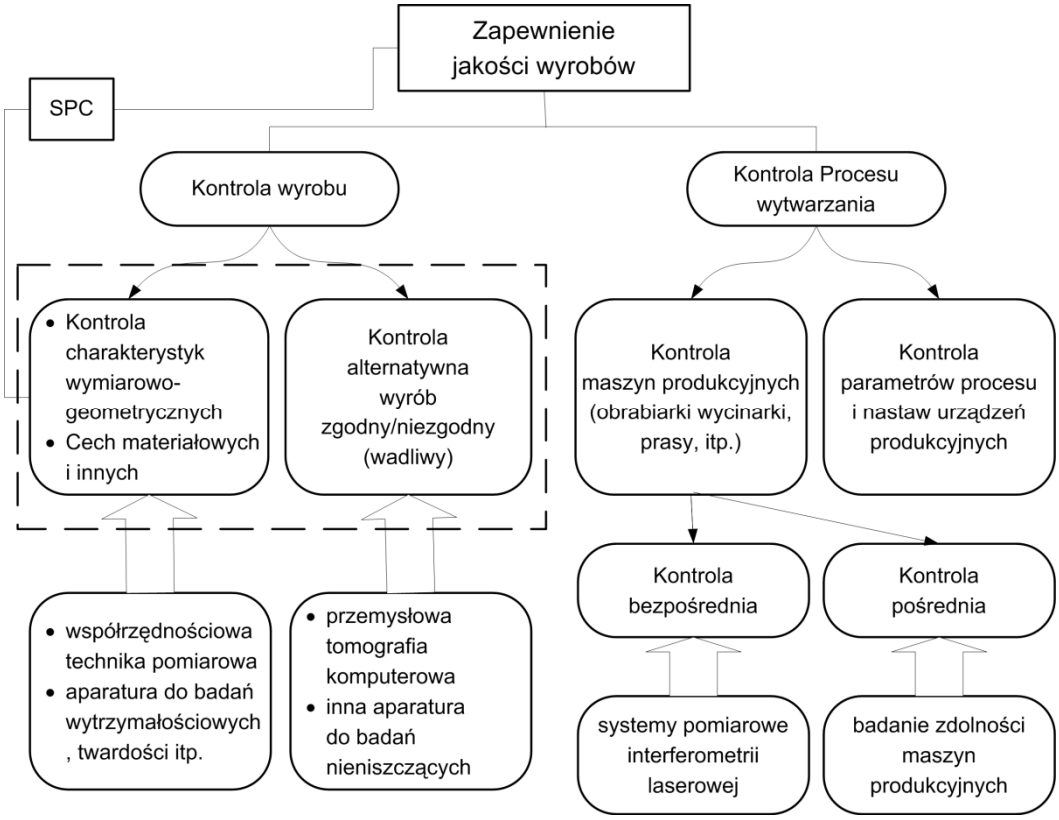
Nadzorowanie jest rozumiane jako proces, który obejmuje pomiar bieżącej wartości określonego parametru (lub parametrów) charakteryzującego stan urządzenia technologicznego, czy też stan procesu, identyfikację zgodności wyniku pomiaru w odniesieniu do wartości dopuszczalnych oraz bieżący monitoring, na podstawie którego następuje stwierdzenie, czy w trakcie realizacji procesu nie nastąpiło jego rozregulowanie. Niekiedy do procedury nadzorowania dodawany jest **moduł prognozujący** stan maszyn i urządzeń technologicznych i realizowanych przez nie procesów wytwórczych. Umożliwia on, przy uwzględnieniu aktualnego trendu zmiany wartości monitorowanych parametrów, prognozowanie (szacowanie) ich wartości w przedziale czasowym poza zakresem, w którym były dokonywane bieżące pomiary [6,13], lub zmianie warunków realizacji procesu technologicznego w określonym przedziale ich zmienności [22].

Główne obszary monitorowania procesów wytwórczych obejmują: przebieg poszczególnych etapów lub całego procesu wytwórczego, monitorowanie zużycia narzędzi, diagnostykę drgań w systemach obróbkowych, analizę termiczną maszyn, analizę innych zakłóceń oddziaływujących na przebieg procesu, analizę geometrii wyrobu, diagnostykę gotowego wyrobu itp. [10,17].

W zapewnieniu jakości wyrobów należy mieć na względzie że:

- jakość jest kształtowana w całym procesie produkcyjnym;
- kontrola finalna nie wpływa bezpośrednio na jakość, a tylko w znacznej mierze eliminuje ryzyko trafienia wadliwego wyrobu do odbiorcy;
- kontrola 100% wyrobów znacząco podnosi koszty produkcji i również nie daje całkowitej pewności, że wadliwy wyrób nie dostanie się do klienta.

Zapewnienie jakości wyrobu wymaga procesowego podejścia w zarządzaniu systemem zapewnienia jakości z równoczesnym uwzględnieniem uwarunkowań dotyczących strategii wytwarzania, metod i systemów pomiarowych, doboru parametrów techniczno-użytkowych urządzeń pomiarowych, lub dominujących cech wyrobu [11].

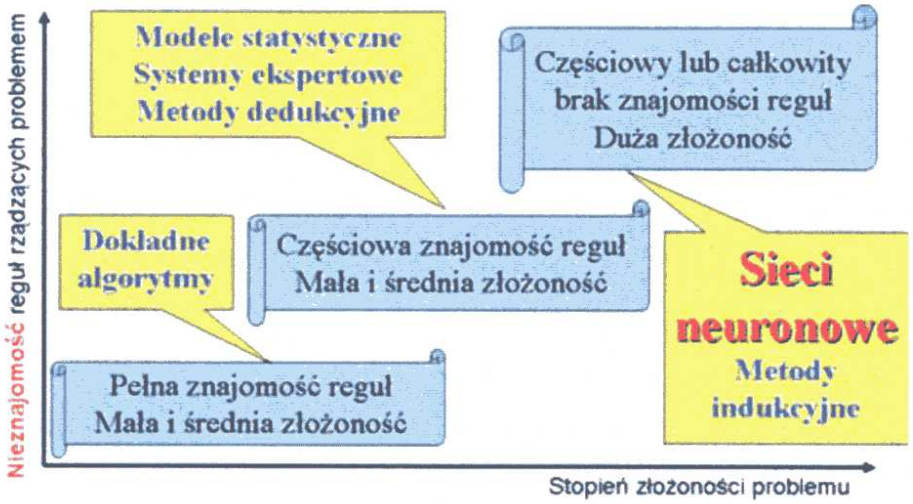


Rys.3. Przykład struktury systemu zapewnienia jakości wyrobów w przemyśle maszynowym.

Źródło: Gawlik J., Sładek J., Ryniewicz A.: Nadzorowanie urządzeń technologicznych i jakości wyrobów w procesie produkcyjnym. Pomiary Automatyka Robotyka 2/2011 s.127-145.

4. Nadzorowanie procesu i urządzeń technologicznych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych

Sztuczne sieci neuronowe mogą być wykorzystane do identyfikacji i prognozowania zużycia elementów maszyny (np. ostrzy narzędzi) oraz wartości parametrów, określających jakość technologiczną wyrobu na podstawie wybranych wielkości fizycznych [6,12]. Ich zaletą jest między innymi to, że identyfikowane parametry, np. geometryczne wskaźniki zużycia ostrzy, lub parametry warstwy wierzchniej przedmiotu, mogą być określane pośrednio za pomocą innych wielkości, które dają się łatwo mierzyć w trakcie trwania procesu obróbki, np. poprzez składowe siły skrawania, emisję akustyczną, i inne. Zaletą sieci neuronowych jest także możliwość ich „douczania się" w miarę nabywanej nowej wiedzy o przebiegu procesu. Sieci neuronowe nie umożliwiają opisu badanych wielkości poprzez podanie wzorów w postaci analitycznej, mogą jednak być włączone w układy sterowania maszyn technologicznych tak, aby po przekroczeniu pewnych, dopuszczalnych wartości progowych wybranego parametru, układ ten zareagował np. wyłączając napęd główny maszyny. Zastosowanie sieci neuronowych jest szczególnie uzasadnione w przypadku dużej złożoności problemu przy równocześnie niewielkiej znajomości reguł rządzących analizowanym procesem [18,20] (rys. 4).



Rys. 4. Możliwe zastosowania sieci neuronowych na tle innych metod obliczeniowych.

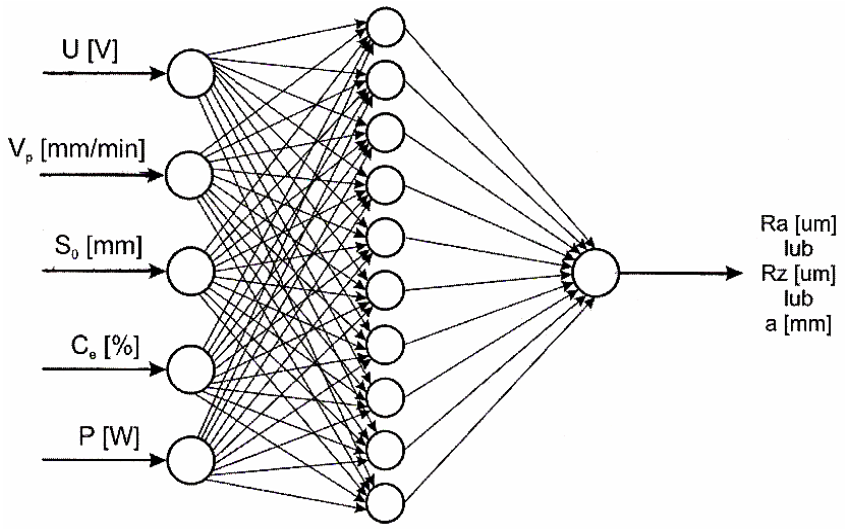
Źródło: Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe i inne systemy sztucznej inteligencji dla medycyny. Inżynieria biomedyczna (red. R. Tadeusiewicz). Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-dydaktyczne AGH, Kraków 2008, s.178-187. ISBN 978-83-7464-168-5.

Wykończeniowe operacje obróbki powierzchni wyrobów w znacznej mierze decydują o ich ostatecznej jakości technologicznej. Jedną z efektywnych, końcowych operacji obróbkowych jest wygładzanie elektrochemiczne. Z punktu widzenia operacji wygładzania ważne są takie wskaźniki technologiczne, jak: grubość usuwanego naddatku oraz wybrane parametry struktury geometrycznej obrobionej powierzchni. Drążenie elektrochemiczne umożliwia otrzymanie dokładności kształtowo – wymiarowej o tolerancji T = 0,1÷0,5 mm przy chropowatości powierzchni Ra ~ 0,1 ÷ 0,3 μm. Uzyskane wyniki w dużym stopniu zależą od właściwości wygładzanego materiału wynikających z jego składu chemicznego i struktury metalograficznej. Uzyskana struktura warstwy wierzchniej zależy od warunków roztwarzania elektrochemicznego w warstwie przyanodowej. Można ją głównie kształtować przez właściwości fizyko-chemiczne elektrolitu, parametry kinematyczne i elektryczne obróbki oraz warunki hydrodynamiczne w warstwie przyściennej (przyanodowej). Zapewnienie odpowiedniego przepływu elektrolitu dla dużych powierzchni, przy grubości szczeliny międzyelektrodowej < 0,5 mm jest bardzo utrudnione, dlatego też drążenie elektrochemiczne może być efektywnie stosowane w operacjach wygładzania niewielkich (< 50 cm^2) i niezbyt skomplikowanych powierzchni.

Im mniejsza powierzchnia obrabiana tym mniejsze zmiany warunków roztwarzania i grubości szczeliny, a wyraźnie większa dokładność odwzorowania i lepsza jakość powierzchni po obróbce. Fakt ten, bezużyteczny w warunkach drążenia, może być wykorzystany w przypadku obróbki elektrodą uniwersalną o prostym kształcie i powierzchni wyraźnie mniejszej od powierzchni obrabianej. Elektroda, najczęściej z częścią roboczą w kształcie czaszy kulistej o promieniu zaokrąglenia R = 1 – 5 mm, przemieszcza się ponad powierzchnią obrabianą wzdłuż odpowiednio zaprojektowanej trajektorii, a elektrolit dostarczany jest dyszą sprzężoną z elektrodą roboczą, lub przez otwór wykonany w elektrodzie.

Przeprowadzone badania optymalizacyjne procesu obróbki elektrochemicznej wskazywały na możliwość zastosowania sieci neuronowych do modelowania struktury geometrycznej powierzchni (SGP) za pomocą sieci neuronowych [9]. Danymi wejściowymi do projektowanej sztucznej sieci neuronowej było pięć badanych czynników obróbki, a na wyjściu z sieci były parametry chropowatości (Ra i Rz) oraz grubość (a) usuniętego naddatku. Do wygenerowania sieci wykorzystano program MatLab z modułem Neural Network

Tool. W procesie uczenia każdy z parametrów wyjściowych był rozpatrywany oddzielnie. Do wykonania obliczeń wybrano sieć jednokierunkową z jedną warstwą ukrytą (rys.5).



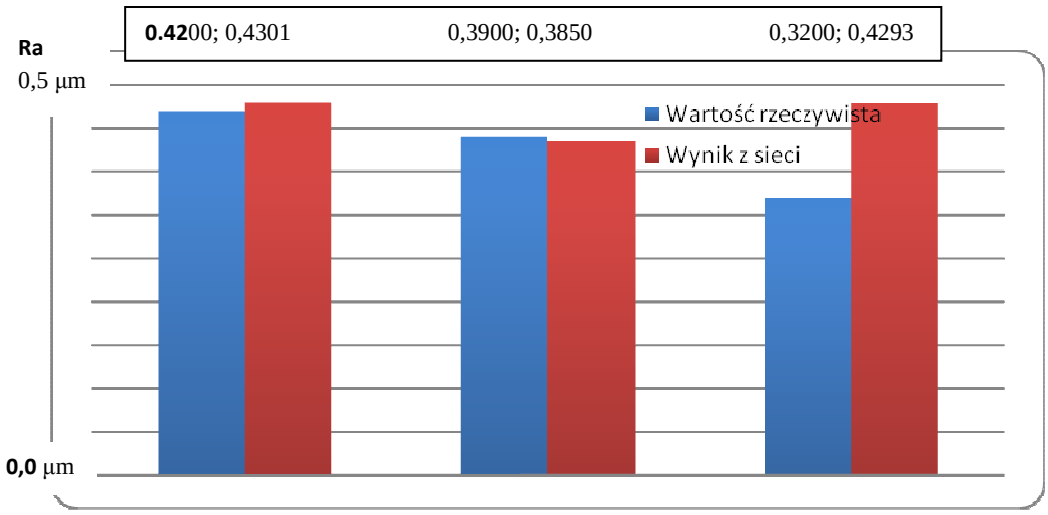
Rys.5. Sieć neuronowa do analizy struktury geometrycznej powierzchni po obróbce elektrochemicznej.

Źródło: Gawlik J., Kostrzewa D., Skoczypiec S.: Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni z zastosowaniem sieci neuronowych. XIV Krajowa i V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Metrologia w Technikach Wytwarzania. Warszawa 2011, s.1-8.

Sieć uczono metodą wstecznej propagacji. Kryterium wyboru struktury sieci był błąd średniokwadratowy. W zależności od założonej struktury sieci różnice odpowiedzi sieci w odniesieniu do wartości zmierzonej zawierały się w przedziale od ok. 1,3% ÷ 34,15%. Uzyskane wyniki wskazują, że można dobrać taką strukturę sieci, która zapewni dobrą zgodność prognozowanych wartości wskaźników jakości powierzchni z wartościami rzeczywistymi. Można też, korzystając z sieci neuronowych opracować syntetyczny wskaźnik jakości, obejmujący łącznie kilka parametrów struktury geometrycznej powierzchni. Może on być wykorzystany do oceny stanu powierzchni np. w procesach obróbki hybrydowej, w której występuje integracja różnych oddziaływań energetycznych na obrabiany przedmiot [3,15].

Sieci neuronowe i systemy rozmyte są stosowane do oprogramowania sterowników logicznych w urządzeniach technologicznych. Przykładem jest między innymi zastosowanie sieci neuronowych do oprogramowania sterownika

logicznego do elektroerozyjnej przecinarki drutowej w celu monitorowania i sterowania procesem przecinania elektroerozyjnego [23].
Skuteczność i sprawność sieci neuronowych jest zależne także od rodzaju funkcji aktywacji neuronów [14,18]. Wybór funkcji aktywacji jest uwarunkowany charakterystyką procesu.

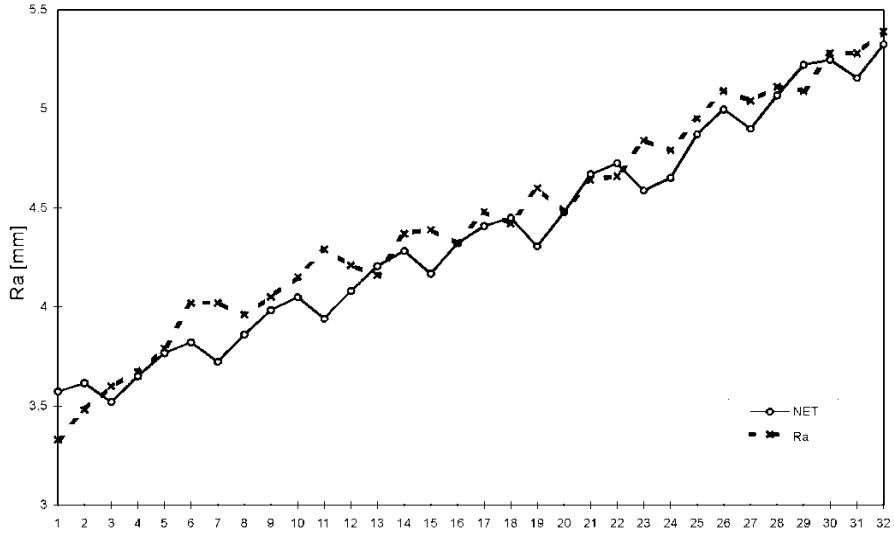


Rys.6. Porównanie danych rzeczywistych parametru Ra z wynikami z sieci.
Źródło: Gawlik J., Kostrzewa D., Skoczypiec S.: Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni z zastosowaniem sieci neuronowych. XIV Krajowa i V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Metrologia w Technikach Wytwarzania. 2011, Warszawa, s.1-8.

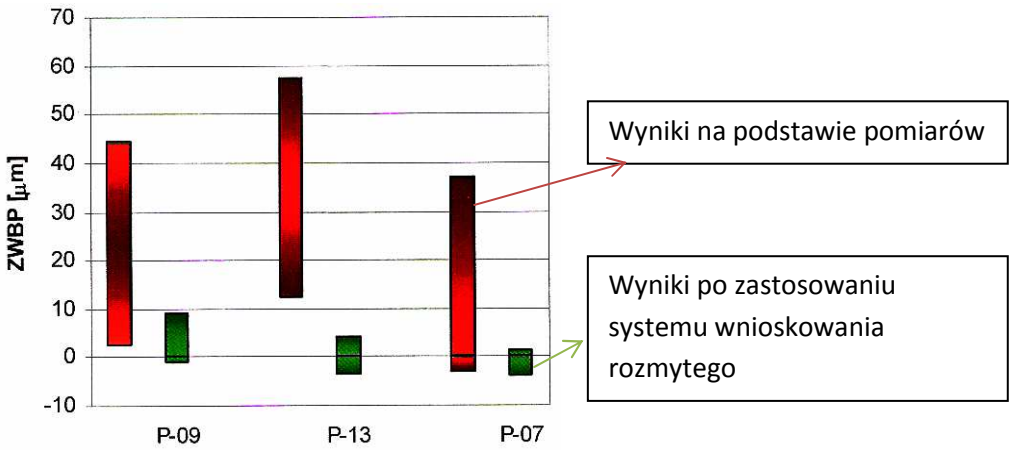
Przykładem jest oszacowanie geometrycznego wskaźnika zużycia ostrzy głowicy frezowej z funkcją aktywacji neuronów w postaci normalnego rozkładu Gaussa, na podstawie pomiaru składowych siły skrawania oraz reguł prawdopodobieństwa warunkowego Bayesa [4].

Sieci neuronowe mogą być z powodzeniem zastosowane do nadzorowania jakości technologicznej wyrobów w procesie obróbki. Przykład nadzorowania chropowatości powierzchni przedmiotu na podstawie pomiaru sygnału emisji akustycznej podczas toczenia stali (rys.7) potwierdza, że prognozowana wielkość może być oceniana pośrednio za pomocą innych parametrów, które można mierzyć w czasie rzeczywistym w trakcie realizacji procesu technologicznego. W tym przypadku pogarszanie się jakości technologicznej obrabianego przedmiotu

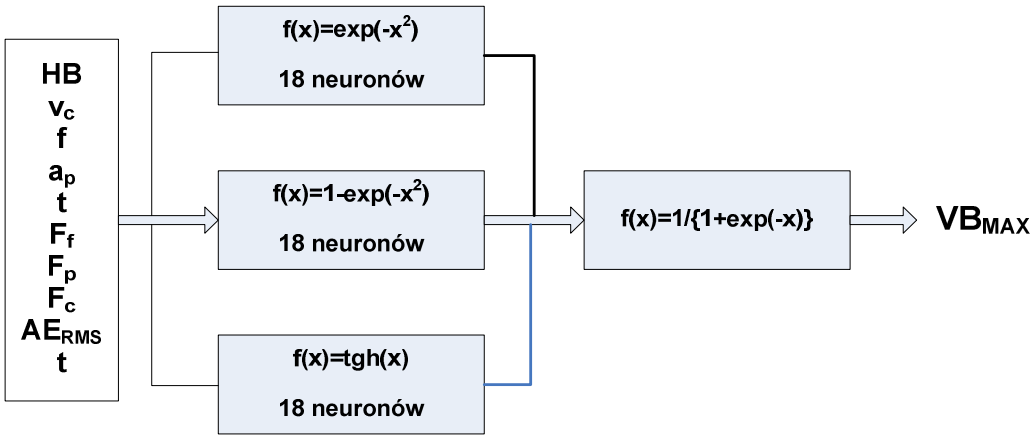
następuje wskutek postępującego zużycia ostrza narzędzia i wzrostu wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej.



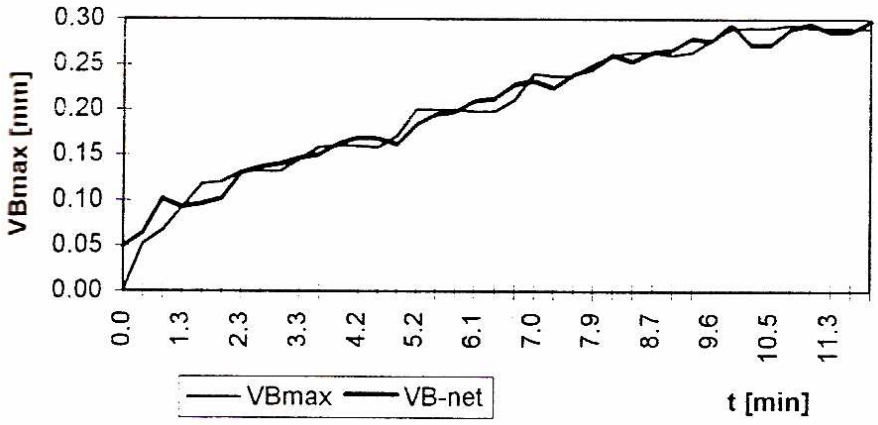
Rys.7. Nadzorowanie chropowatości powierzchni przedmiotu podczas toczenia.
Źródło:



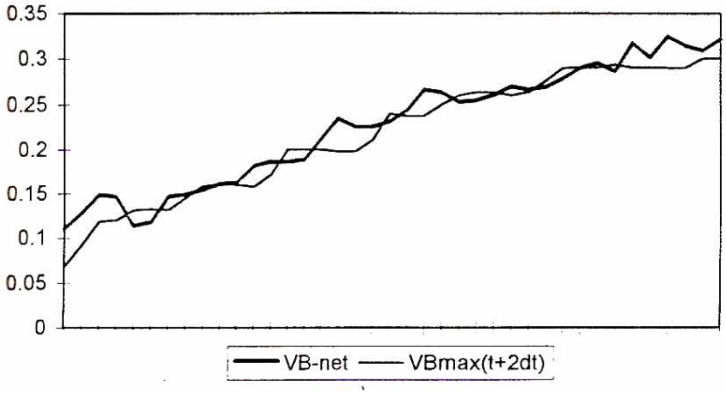
Skuteczność systemu wnioskowania rozmytego do kompensacji błędów odkształceń termicznych szlifierki. ZWBP – zakresy wartości błędów pozycjonowania.



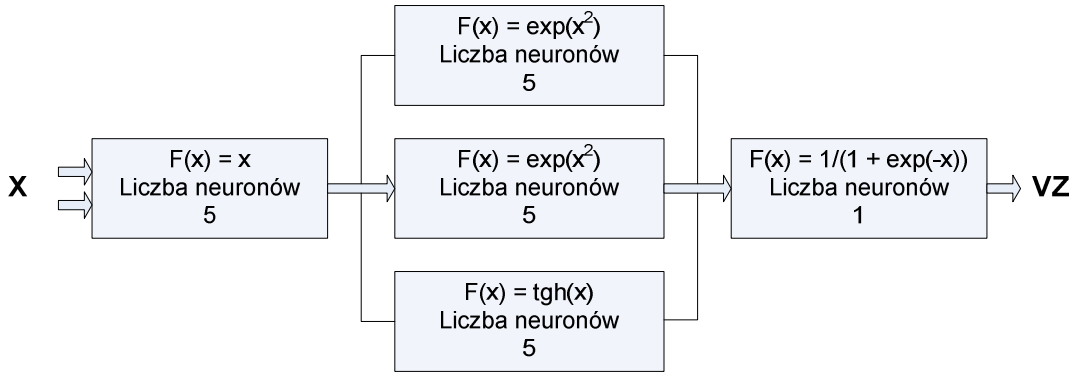
Schemat sieci prognozującej zużycie ostrzy noży tokarskich.



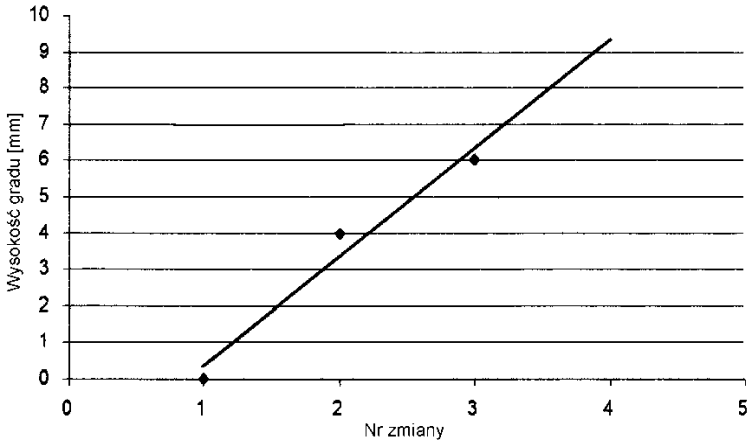
Wynik działania sieci



Prognoza sieci



Analiza przebiegów zużycia ostrzy piły tarczowej (przykład rys. 7a) oraz przyrostu wskaźnika technologicznego – zadzioru na przedmiocie obrabianym (rys. 7b.) wskazuje, że wskaźniki te nie osiągają wartości granicznych po tym samym czasie pracy stanowiska. Dowodzi to, że istnieje niewykorzystana rezerwa potencjalnych zdolności skrawnych narzędzia (zdolności do realizacji procesu cięcia). Nie jest więc uzasadniona z ekonomicznego punktu widzenia wymiana piły po trzeciej zmianie pracy urządzenia (jak stosowano to dotychczas) lecz po zmianie czwartej, bowiem moc urządzenia oraz przebieg procesu zużycia (brak zużycia wytrzymałościowego) nie uzasadniają wcześniejszej wymiany piły tarczowej.



Rys. 7. Przyrost zużycia ostrzy piły (a) oraz technologicznego wskaźnika jakości – gradu (b) w czasie cięcia (jednostka czasu = 1zmiana robocza).

Fig.7. The increase of saw edges wear during cutting process (a) and technological indicator of quality – burr (b) during cutting (time unit = 1 shift)

Korzystając z tej samej bazy danych przetestowano 11 sieci neuronowych do rozpoznawania stanu zużycia piły do cięcia kształtowników. Wyznaczono względny błąd "δ", określający różnicę pomiędzy wynikiem (VZ_p) uzyskanym z pomiarów, a wynikiem (VZ_s) wygenerowanym przez sieć neuronową, odniesioną do wartości (VZ_p) badanej wielkości uzyskanej z pomiarów. Błąd ten nie przekraczał wartości 10 % w odniesieniu do wartości zmierzonej.

Rozwój zastosowań sieci neuronowych do diagnozowania i prognozowania stanu narzędzi oraz przedmiotu w procesie obróbki ma miejsce w połączeniu z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej, teorii zbiorów rozmytych i algorytmów genetycznych. W przypadku analizy sygnałów zmiennych w czasie dobre wyniki diagnostyczne daje analiza mierzonych sygnałów w dziedzinie częstotliwości – cyfrowa transformacja DWT (Discrete Wavelet Transform) na bazie analizy fal elementarnych. Przykład zastosowanej sieci neuronowej do prognozowania przebiegu ściernego zużycia ostrzy noży tokarskich przedstawiono na rys.8a efekt działania tej sieci na rys.9.

Współrzędnościowy system pomiarowy (WSP) to system pomiarowy, dla którego jako pomiar bezpośredni może zostać uznany pomiar współrzędnych punktu pomiarowego.

Najbardziej znane systemy współrzędnościowe realizujące pomiary elementów wielkogabarytowych to laserowe systemy śledzące. Nazwa ta wiąże się z zastosowaniem mechanizmu „śledzącego", który automatycznie prowadzi wiązkę lasera podążając za ruchomym reflektorem. Do najbardziej znanych producentów laserowych systemów śledzących zaliczamy takie firmy jak Leica Geosystems (rys. 2), Faro czy Automated Precision Inc. (API)

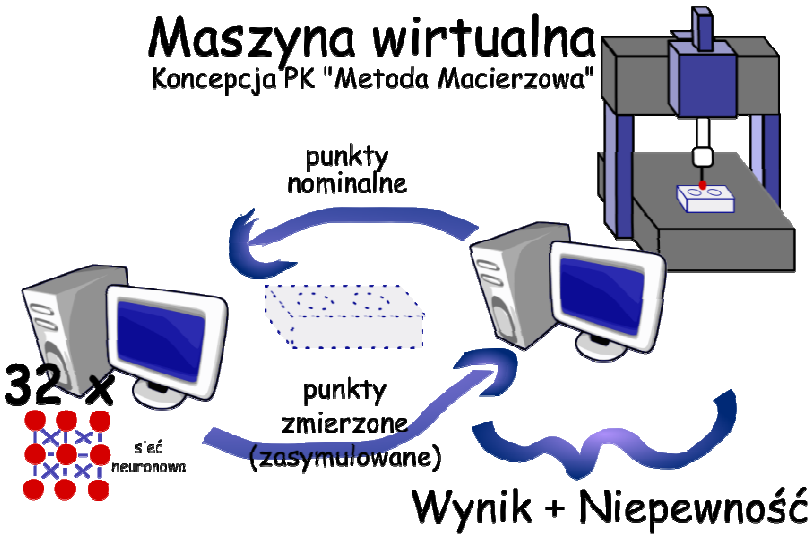
Rys.3 Współrzędnościowa Maszyna Pomiarowa PMM12106

Ocena dokładności WMP realizowana na podstawie pomiaru długości jest próbą przeniesienia metod oceny konwencjonalnych przyrządów pomiarowych.

Na tej właśnie koncepcji opierają się państwowe lub międzynarodowe wytyczne i normy: ANSI B89.12-90, BS6808-2, ISO10360-2, JIS B7440 oraz zalecenia: VDI/VDE2617, CMMA.

Podstawową jednak wadą wszystkich omawianych metod jest niezgodność z teorią pomiarów współrzędnościowych, gdzie, jak wiadomo, przedmiotem bezpośredniego pomiaru nie jest długość, lecz współrzędna punktu na powierzchni przedmiotu mierzonego.

na Politechnice Krakowskiej opracowano nowy komputerowy model realizujący wirtualną WMP (w ramach projektu PB1367/T07/95/08). Najnowszy model dedykowany do maszyn o dużych zakresach pomiarowych Laserowy Wzorzec Stopniowy opracowany został w ramach pracy [5].

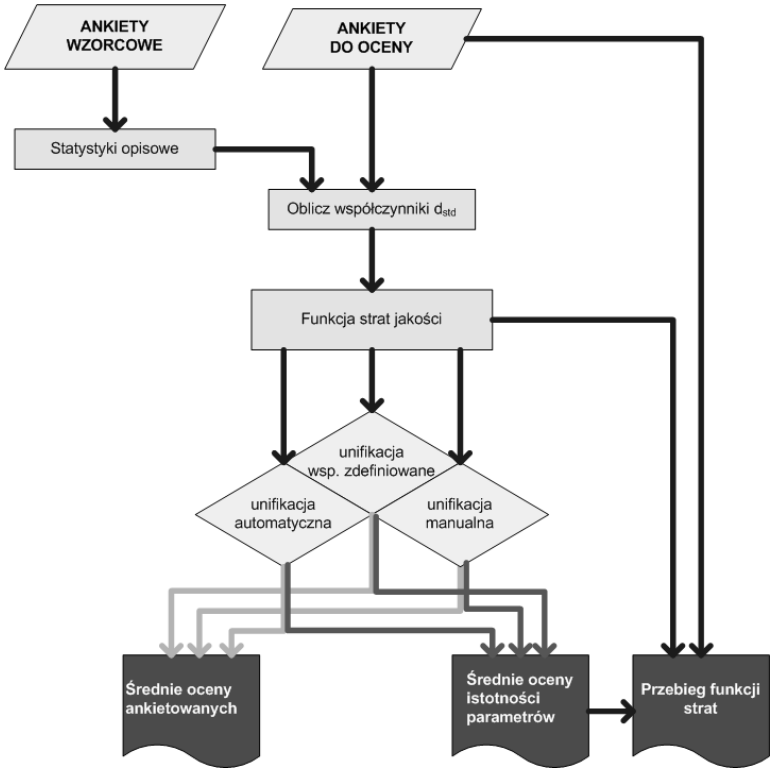


Najnowocześniejszą koncepcją maszyny wirtualnej jest model Virtual Neuro CMM [1] pozwalający na wyznaczenie błędów WMP z wykorzystaniem różnych orientacji i pozycji płyty kulowej jako podstawa budowy siatki punktów retencyjnych i Metody Macierzowej. Metoda ta nie wymaga wyznaczania błędów geometrycznych WMP i identyfikuje dokładność w poszczególnych punktach. Uzyskane wyniki są wykorzystywane przez oprogramowanie Virtual Neuro CMM oparte o sztuczne sieci neuronowe. Koncepcja ta zaprezentowana została na Rys. 9.

Ciągłe doskonalenie i dopasowywanie się do oczekiwań jakościowych rynku jest koniecznością dla konkurujących przedsiębiorstw i łączy się z umiejętnym wykorzystywaniem narzędzi i technik statystycznych w analizach rynków, procesów, jakości wyrobów, przyczyn braków i niezgodności oraz badaniu innowacyjności. Opracowano metodę i narzędzie wspomagające proces podejmowania decyzji dotyczących jakości wyrobów, pozwalających na:

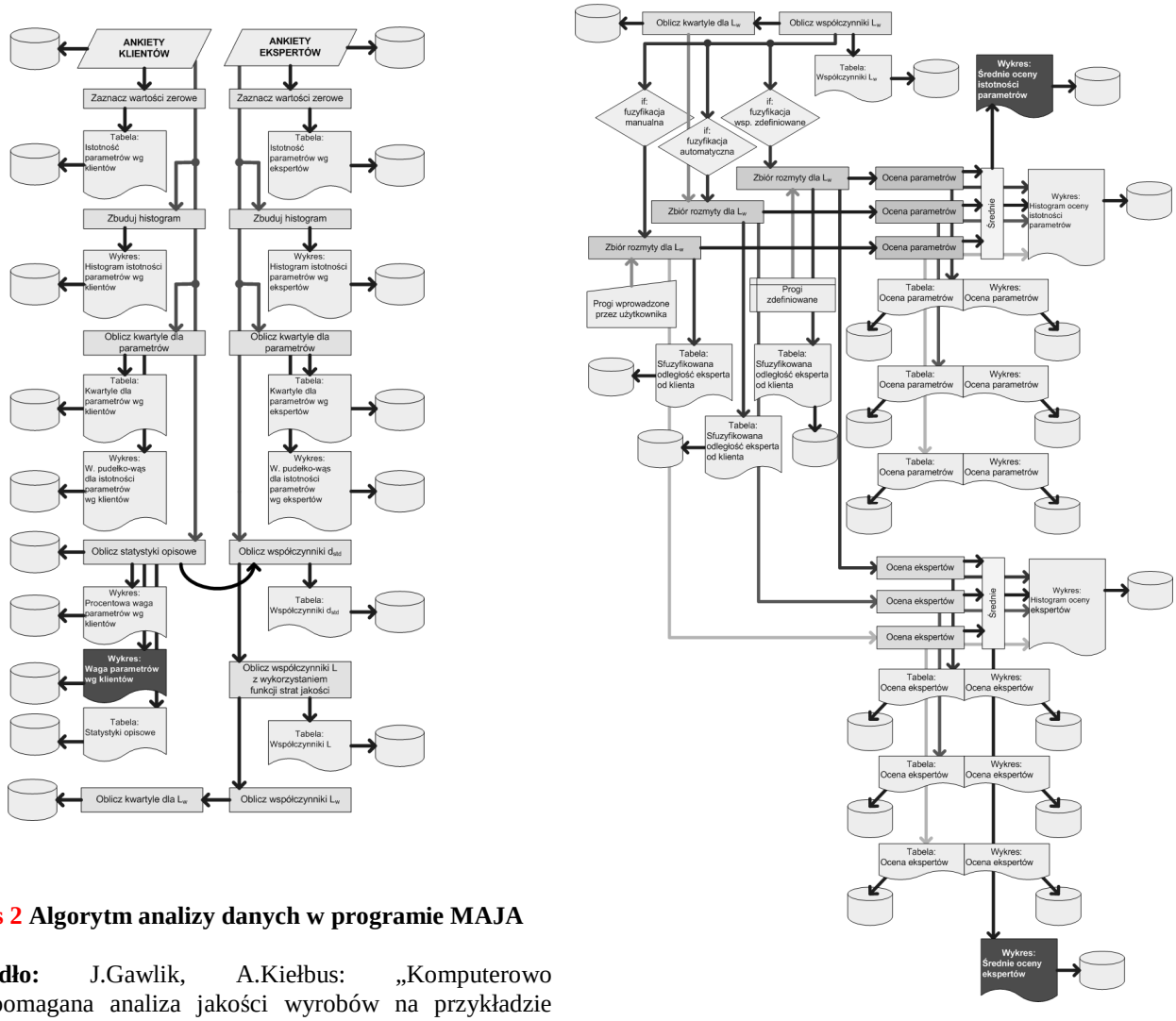
- klasyfikację producentów spełniających oczekiwania klientów
- klasyfikację parametrów wpływających na jakość wyrobów,
- oszacowanie strat z tytuł złej jakości danego parametru wyrobu.

Schemat postępowania w opracowanej metodologii, prowadzi do uzyskania odpowiedzi dotyczącej istotności parametrów/kryteriów w opiniach producentów (ekspertów) w odniesieniu do opinii klientów (użytkowników) oraz sklasyfikowanie producentów pod względem spełnienia oczekiwań klientów.



Rys. 1. **Uproszczony algorytm analizy danych w programie MAJA**

lub



Rys 2 Algorytm analizy danych w programie MAJA

źródło: J.Gawlik, A.Kiełbus: „Komputerowo wspomagana analiza jakości wyrobów na przykładzie maszyn technologicznych" KZZ, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2009

Pierwszym krokiem (Rys. 1 lub2) jest wyznaczenie kwartyli dla poszczególnych parametrów, którym klienci i producenci przypisali wagi w określonej skali – wyznaczenie następuje osobno dla zbioru producentów i

klientów. Dzięki ich wyznaczeniu możliwym jest skonstruowanie wykresu typu pudełko-wąsy, obrazującego skupienie danych i ich skośność.

Na podstawie danych od klienta wyznacza się statystyki opisowe (tj. średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe, wariancję, maksymalną i minimalną wartość, przedziały ufności i procentową i bezwymiarową wagę średniej arytmetycznej), które posłużą do obliczenia współczynnika d_{st} – standaryzowanej odległości producenta od średniego klienta.

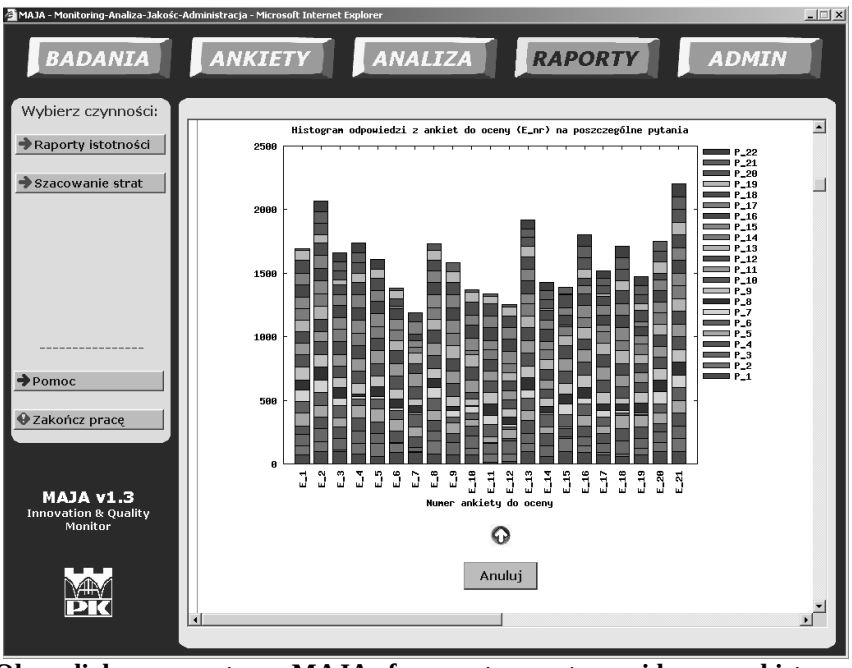
Wyznaczony współczynnik d_{st}, poprzez obliczenie ilorazu różnicy wartości wagi parametru wg producenta i średniej arytmetycznej przez średnie odchylenie standardowe, służy do obliczenia kwadratowej standaryzowanej odległości producenta od średniego klienta L (funkcja strat jakości), na podstawie zależności:

$$f(d_{st}) = \begin{cases} 0, & dla \quad d_{st} > 0 \\ d_{st}^2, & dla \quad d_{st} \leq 0 \end{cases} \tag{2}$$

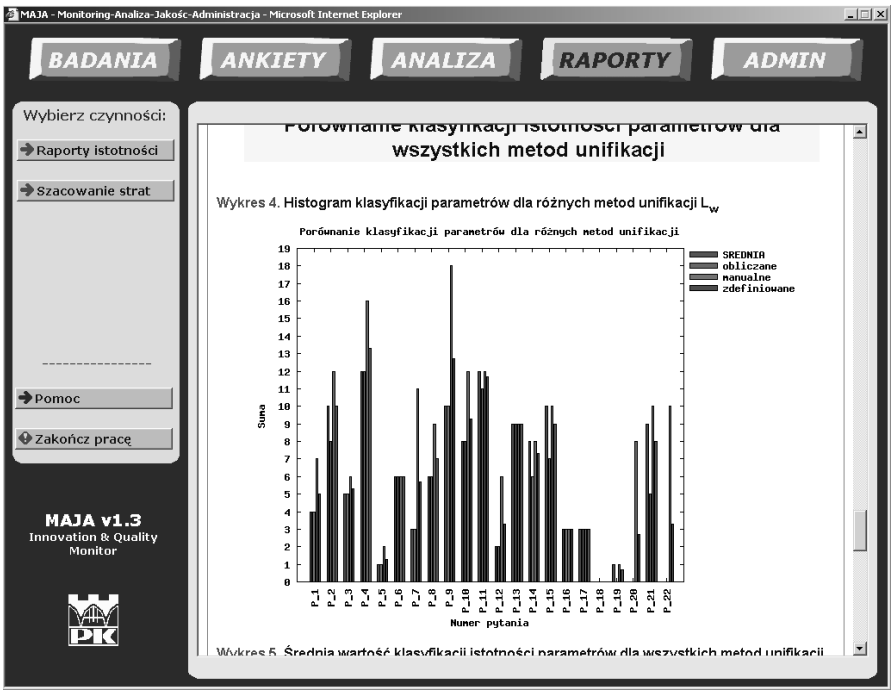
Następnie wyznacza się L_w – ważoną kwadratową standaryzowaną odległość od średniego klienta poprzez odniesienie wartości funkcji strat jakości do bezwymiarowej wagi średniej arytmetycznej uzyskanej w statystykach opisowych.

$$L_w = L \cdot w \tag{2}$$

Po określeniu wartości dla funkcji start, dokonuje się wyboru jednej z trzech metod unifikacji (ujednolicenia wyników do różnych analiz do określonego zakresu poziomów wartości) tj.: unifikacji manualnej, dla której ręcznie określa się progi unifikacji, unifikacji współczynnika zdefiniowanego, dla której progi zostały ustalone eksperymentalnie w wyniku analiz danych o różnym charakterze, oraz unifikacji automatycznej, dla której progi obliczono na podstawie rozkładu kwartyli dla *Lw*. Otrzymane dane poddawane są obróbce rankingowej służącej do generacji stosownych raportów. Przykład okien programu z wyświetlonymi elementami raportów przedstawiają rysunek 3 i 4.



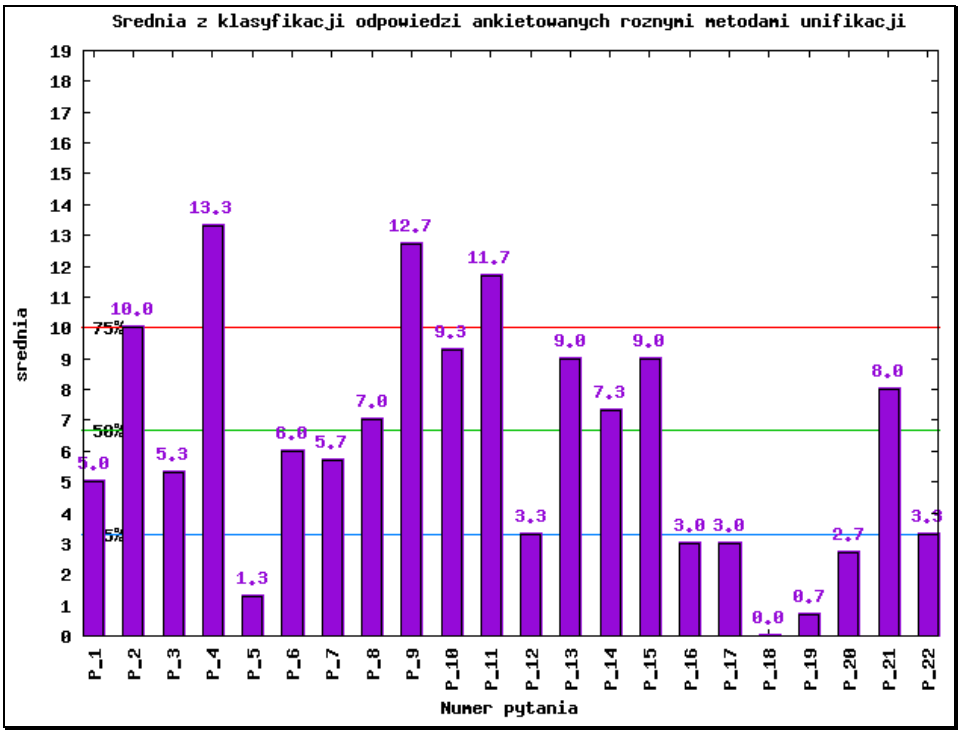
Rys. 3. **Okno dialogowe systemu MAJA: fragment raportu z widocznym histogramem dla odpowiedzi producentów na poszczególne pytania ankietowe**



Rys. 4. **Okno dialogowe systemu MAJA: fragment raportu z widoczną klasyfikacją istotności parametrów na podstawie odpowiedzi klientów, uzyskaną trzema metodami unifikacji**

źródło: J.Gawlik, A.Kiełbus, D.Karpisz: „MAJA- system do wspomagania oceny jakości wyrobów z punktu widzenia producenta i klienta", Bazy danych- rozwój metod i technologii ,Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2008

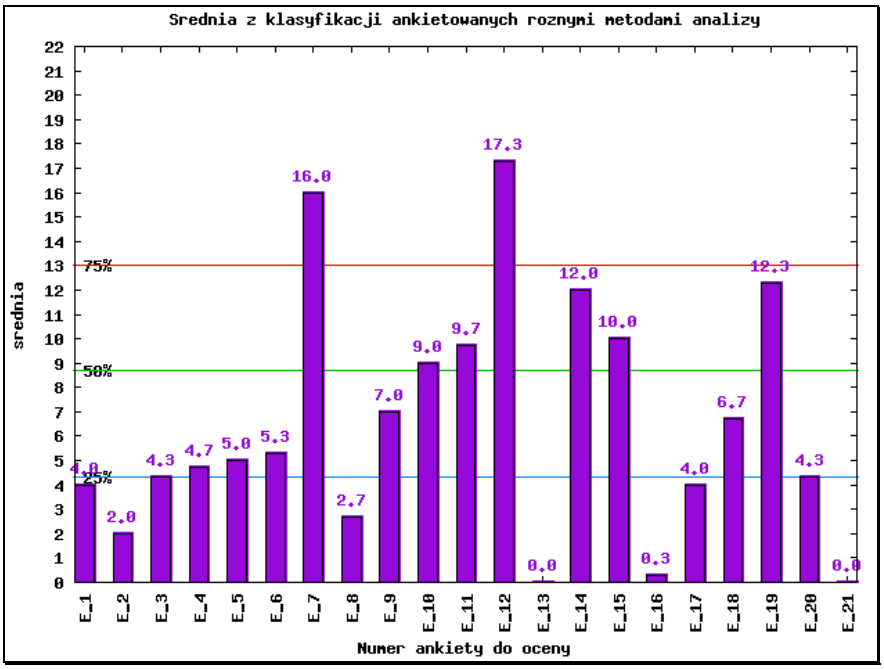
Otrzymane zunifikowane wartości ocen sumuje się dla poszczególnych parametrów odrębnie dla każdego zbioru L_w i otrzymuje ocenę tych parametrów pod względem spełnienia oczekiwań producenta względem klienta (im wyższa wartość oceny tym parametr może generować większe straty dla producenta, ponieważ ocena oczekiwań producenta znacznie odbiega od oczekiwań klienta; im niższa wartość, tym parametr jest bardziej odporny na zakłócenia, a tym samym na straty co oznacza że oczekiwania klienta i producenta są ze sobą zgodne). Uśredniając wartości oceny parametrów zawarte w powstałych trzech zbiorach otrzymuje się na wykresie uśrednioną klasyfikację ocen istotności parametrów wg producenta w stosunku do klienta (***Wyk. 4.19.***).



Wyk. 4.19. *Średnia wartość klasyfikacji istotności parametrów dla wszystkich metod unifikacji*

Im wyższa wartość oceny danego parametru (Wyk. 4.19), tym może on generować większe starty, w przypadku niespełnienia wymagań stawianych przez klientów. Dodatkowo wykres posiada linie 25%, 50% i 75% pozwalające wyłonić odpowiednią ilość parametrów do dalszej analizy. W ramach badania przemysłu maszynowego na przykładzie obrabiarek CNC, na Wykresie 4.19, widoczne jest iż, przyjmując, że parametr może generować istotne straty gdy jego wartość przekracza 50% z maksimum w tej ocenie, to należy przyjrzeć się parametrom oznaczonym jako P_2, P_4, P_8, P_9, P_10, P_11, P_13, P_14, P_15 i P_21.

Podobnie jak dla klasyfikacji parametrów, dokonano klasyfikacji producentów spełniających oczekiwania klientów (***Wyk. 4.24.***).



Wyk. 4.24. *Średnia wartość klasyfikacji producentów z różnych metod unifikacji*

Im wyższa wartość oceny (średniej) dla danego producenta (Wyk. 4.24), tym bardziej, ankietowany produkt (lub produkty) tego producenta mogą odbiegać od oczekiwań rynku. Na wykresie, dodatkowo naniesiono linie 25%, 50% i 75% z wartości maksymalnej, pozwalające łatwiej wyłonić producentów nie spełniających oczekiwań klientów.

W ramach przedmiotowego badania, przyjmując jako kryterium selekcji, przekroczenie wartości średniej powyżej linii 50%, można wysnuć wniosek, że respondenci, oznaczeni jako E_7, E_10, E_11, E_12, E_14, E_15 i E_19,

powinni zweryfikować swoje założenia produktowe i dostosować się (jeśli jest to możliwe) do wymagań rynku.

Aktualnie są podejmowane prace badawczo-wdrożeniowe nad rozwojem systemów obustronnej komunikacji głosowej człowiek – maszyna w celu sterowania procesami wytwórczymi.

LITERATURA

[1]. Banaszak Z., Muszyński W.: Systemy elastycznej automatyzacji dyskretnych procesów produkcyjnych, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1991.

[2]. Czyszpak T.: Zastosowanie systemów wnioskowania rozmytego w diagnostyce obrabiarki i procesu skrawania. Rozprawa doktorska (promotor A. Sokołowski) Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Gliwice 2008.

[3]. Davim Paulo J. (editor): Surface Integrity in Machining. Surface Integrity in Machining, Springer, 2010.

[4]. Dong J., Subrahmanyam K.V.R., Wong Y.S., Hong G.S., Mohanty A.R.: Bayesian-inference-based neural networks for tool wear estimation. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2006, 30, s.797-807.

[5]. Durlik I.: Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych, część II, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa, 1998, ISBN 83-85428-18-6.

[6]. Gawlik J., Karbowski K: Matematyczne modelowanie procesu zużycia narzędzi skrawających. Nadzorowanie stanu narzędzi. Prace Naukowe Politechniki Krakowskiej. Seria Mechanika. Monografia 231, Kraków 1998.

[7]. Gawlik J., Kiełbus A.: Metody i narzędzia w analizie jakości wyrobów. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008. ISBN 978-83-7242-465-5

[8]. Gawlik J.; Kiełbus A.: Metodologia i program komputerowy do wspomagania decyzji proinnowacyjnych. Zarządzanie organizacjami w gospodarce rynkowej. (red. W. Waszkielewicz). Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-dydaktyczne AGH, Kraków 2007, s.284-292. ISBN 978-83-7464-153-1.
[9]. Gawlik J., Kostrzewa D., Skoczypiec S.: Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni z zastosowaniem sieci neuronowych. XIV Krajowa i V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Metrologia w Technikach Wytwarzania. 2011, Warszawa, s.1-8.
[10]. Gawlik J., Ruszaj A.: Nadzorowanie stanu strefy obróbki w systemach wytwarzania. Inżynieria Maszyn. R.14, z.2, 2009, s.7-19.
[11]. Gawlik J., Sładek J., Ryniewicz A.: Nadzorowanie urządzeń technologicznych i jakości wyrobów w procesie produkcyjnym. Pomiary Automatyka Robotyka 2/2011 s.127-145.
[12]. Gawlik J., Sładek J., Ryniewicz A., Kowalski M., Gąska A.: Wielofunkcyjna ocena jakości urządzeń technologicznych i jakości wyrobów. Inżynieria Maszyn Vol. 15, zeszyt 3, 2010, s.20–34.
[13]. Gawlik J., Zębala W.: The Strategy of Wear Prediction in CIM Concept. Elektronik und Informationstechnik (e & i), Wien, 114 Jg, Heft 4, 1997, s. 191-194.
[14]. Knosala R.: Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji. WNT, Warszawa 2002. ISBN 83-204-2767-3.
[15]. McGeough J. (editor) Micromachining of Engineering Materials. Joseph, Marcel Dekker, Inc. 2002
[16]. Perechuda K.: [2000], Zarządzanie przedsiębiorstwem przyszłości. Koncepcja, modele, metody, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa. ISBN 83-85428-18-6.
[17]. Ritou M., Garnier S., Furet B., Hascoet J-Y. : A new versatile in-process monitoring system for milling . Int. J. of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) s. 2026-2035.
[18]. Rutkowska A., Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. PWN Warszawa 1997.
[19]. Świć A., Taranenko W.: Projektowanie technologiczne elastycznych systemów produkcyjnych, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2003.
[20]. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe i inne systemy sztucznej inteligencji dla medycyny. Inżynieria biomedyczna (red. R. Tadeusiewicz). Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-dydaktyczne AGH, Kraków 2008, s.178-187. ISBN 978-83-7464-168-5.
[21]. Tonshoff H. K., Winkler S. Ehrmann M.: Holonic Manufacturing - the router to autonomous and cooperative manufacturing Systems, 9th Symposium on Information Control In Manufacturing, Nancy-Metz: Metz University, 1998.
[22]. Tsao C.C.: Prediction of trust force of step drill in drilling composite material by Taguchi method and radial basis function network. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2008, 36, s.11-18.
[23]. Yan M.-T., Chien H.-T. : Monitoring and control of the micro wire-EDM process. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, 2007, s. 148-157