

prof. dr hab. inż. Józef Gawlik¹, prof. dr hab. inż. Jerzy Śladek²,
dr inż. Andrzej Ryniewicz²

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny

¹Katedra Inżynierii Procesów Produkcyjnych

²Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej

NADZOROWANIE URZĄDZEŃ TECHNOLOGICZNYCH I JAKOŚCI WYROBÓW W PROCESIE PRODUKCYJNYM

Streszczenie: Przedstawiono charakterystykę kształtowania jakości technologicznej wyrobów, zwracając uwagę na procesowe podejście do zapewnienia jakości. Wprowadzając pojęcie nadzorowania wyróżniono bieżący pomiar i kontrolę parametrów charakteryzujących jakość technologiczną, monitorowanie oraz prognozowanie zmiany wartości tych parametrów. Omówiono zasady i przykłady współczesnych metod monitorowania z zastosowaniem tomografii komputerowej, współrzędnościowej techniki pomiarowej, systemów wizyjnych, systemów laserowych. Podano podstawowe metody i modele stosowane w prognozowaniu charakterystyk urządzeń technologicznych oraz przykłady ich zastosowania.

Słowa kluczowe: jakość wyrobu, monitorowanie, prognozowanie stanu urządzeń technologicznych i jakości wyrobu

SUPERVISION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT AND QUALITY OF PRODUCTS IN THE MANUFACTURING PROCESS

Summary: The paper contains the characteristics of products technological quality development, paying attention to the process approach in quality providing including the production strategy, methods and systems of measurement. The concept of monitoring the status of technological equipment and product quality was introduced. The current measurement and the control of parameters characterizing the technological quality, monitoring and forecasting changes in these parameters were highlighted. The paper also contains the graphics diagrams of the structure of these systems. Principles and examples of modern methods for monitoring with use of computed tomography, coordinate measurement technique, vision systems, laser systems were characterized. The condition and limitations for these methods and techniques usage were given. A new approach to coordinate measuring (virtual coordinate measuring machine) and measurement uncertainty was presented. The paper consists the basic models and methods (the theory of exponential equalization and neutral networks) used in prediction of the characteristics of technological equipment and product quality). There are lots of examples of the application of these methods developed by the authors of the paper.

Keywords: product quality, monitoring, forecasting of technological and product quality

1. KSZTAŁTOWANIE JAKOŚCI TECHNOLOGICZNEJ WYROBÓW

Jakość technologiczna wyrobu, kształtowana w procesie wytwarzania, w głównej mierze zależy od właściwości i stanu urządzeń technologicznych. Rozwój nowych strategii

wytwórczych wymaga doskonałości jakości systemów obróbkowych, zastosowania nowych metod i systemów pomiarowych, aktywnie wspomagających nadzorowanie stanu urządzeń technologicznych i procesów produkcyjnych.

Nadzorowanie jest rozumiane jako proces, który obejmuje pomiar bieżącej wartości określonego parametru (lub parametrów) charakteryzującego stan urządzenia technologicznego, czy też stanu procesu, identyfikację zgodnie z wartością wyniku pomiaru w odniesieniu do wartości dopuszczalnych oraz bieżący monitoring, na podstawie którego następuje stwierdzenie, czy w trakcie realizacji procesu nie następuje jego rozregulowanie. Nadzorowanie może też zawierać moduł prognozujący stan systemów technicznych (urządzeń technologicznych i realizowanych przez nie procesów) przy uwzględnieniu aktualnego trendu zmiany wartości monitorowanych parametrów. Głównymi obszarami monitorowania procesów wytwórczych są [1, 2, 6, 10, 12, 13]: przebieg poszczególnych etapów lub całego procesu wytwórczego, monitorowanie zużycia narzędzi, diagnostyka gotowego wyrobu, analiza geometrii wyrobu, diagnostyka drgań w systemach obróbkowych, analiza termiczna maszyn, analiza innych zakłóceń w przebiegu procesu.

Rozpatrując zagadnienie jakości wyrobów należy pamiętać, że:

- jakość jest kształtowana w całym procesie produkcyjnym;
- kontrola finalna nie wpływa bezpośrednio na jakość, a eliminuje w znaczący sposób ryzyko trafienia wyrobu wadliwego do odbiorcy;
- kontrola 100 % wyrobów znacząco podnosi koszty produkcji i również nie daje całkowitej pewności, że wadliwy wyrób nie dostanie się do klienta;
- dla zapewnienia odpowiedniego poziomu jakości wyrobu uzasadnione jest połączenie nadzorowania stanu urządzeń technologicznych z nadzorowaniem procesu wytwarzania.

Zapewnienie jakości wyrobu wymaga procesowego podejścia w zarządzaniu systemem zapewnienia jakości [4], z równoczesnym uwzględnieniem nowych uwarunkowań dotyczących strategii wytwarzania, metod i systemów pomiarowych, doboru parametrów techniczno-użytkowych lub dominujących cech wyrobu.

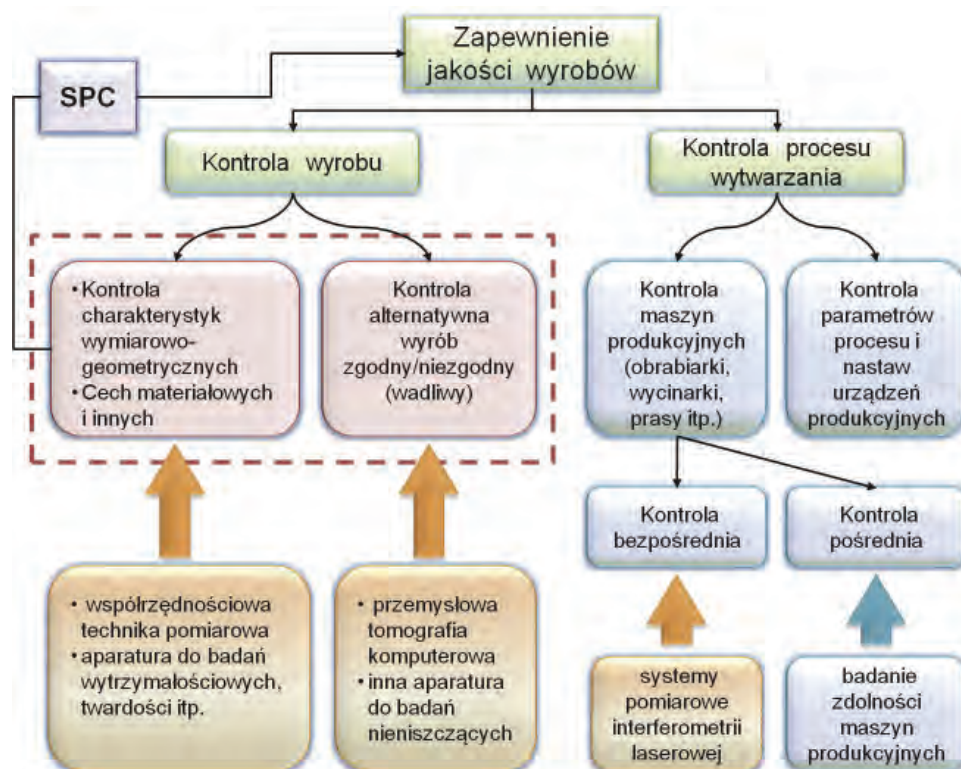
2. MONITOROWANIE JAKOŚCI WYROBÓW

Wielkościami fizycznymi wykorzystywanymi do monitorowania są m.in.: emisja akustyczna, składowe siły skrawania lub wielkości związane (np. odkształcenia narzędzia), drgania mechaniczne i natężenie hałasu (poziom ciśnienia akustycznego). W monitoringu procesów wytwórczych są stosowane również laserowe układy pomiarowe i kamery CCD [7].

Kontrola procesu wytwarzania może być prowadzona w dwojaki sposób:

- przez pomiary cech wyrobu (np. wymiaru, kształtu, położenia, właściwości warstwy wierzchniej, itp.) w różnych stadiach tego procesu;
- poprzez metrologiczny nadzór nad jego parametrami.

Objęcie kontrolą wszystkich (czy też dużej liczby) parametrów jest na ogół ze względu na względy technicznych i ekonomicznych niemożliwe do wykonania. Zważywszy, że istnieje wiele zmiennych determinujących jakość wyrobu, część kontroli powinna mieć charakter statystyczny (rys. 1).



Rys. 1. Przykład struktury systemu zapewnienia jakości wyrobów w przemyśle maszynowym
 Fig. 1. General structure of quality assurance system in machine industry

Dla zapewnienia sterowalności procesu produkcyjnego i jakości wyrobów skuteczną metodą jest kontrola charakterystyk wymiarowo-geometrycznych w ujęciu statystycznym, wiążąc Statystyczne Sterowanie Procesem (SPC). Współczesne systemy produkcyjne wykorzystują w tym celu zautomatyzowane układy pomiarowe, a w przypadkach bardziej skomplikowanych wyrobów współrzędnościową technikę pomiarową [14, 15]. Natomiast w przypadku kontroli alternatywnej do wykrywania wewnętrznych wad coraz częściej wykorzystuje się tomografię komputerową [8, 9]. Obie wspomniane techniki zapewniają przestrzenny charakter pomiaru, co pozwala na lepsze niż w innych wypadkach, odwzorowanie cech wyrobu. Mimo to, jeśli pomiarowi podlega wyrób, to uwaga jest skupiona na procesie. Jeżeli wyniki wykazują odchylenie od przyjętych założeń, to należy poddać analizie poprawność funkcjonowania maszyn i urządzeń technologicznych. Do jakościowej oceny procesów dyskretnych oraz ciągłych są stosowane karty kontrolne. Ich zastosowanie ograniczają: brak adekwatności w warunkach nietypowych rozkładów prawdopodobieństwa, istnienie trendów okresowych, nieoczekiwane zmiany w wycentrowaniu nastaw, czy też krótkie serie wyrobów.

W wielu przypadkach skuteczne jest zapewnienie jakości wyrobu poprzez nadzorowanie procesu wytwarzania. Stały nadzór koncentruje się na kontroli poszczególnych składników procesu wytwarzania i dotyczy głównie maszyn i urządzeń technologicznych. Stosowane są dwa podejścia do tego zagadnienia. Podejście pierwsze polega na kontroli bezpośredniej maszyn (rys. 2), zaś podejście drugie na wyznaczeniu syntetycznego wskaźnika jakościowego dla maszyny, np. wskaźników C_m , C_{mk} (rys. 3). Metoda pierwsza pozwala ocenić praktycznie wszystkie składowe błędy sumarycznego maszyny związane z jej geometrią i poprawnością kinematyczną, ale wymaga specjalistycznej aparatury, wzorców oraz względnie długiego czasu na wykonanie badań kompleksowych. Ocena stanu maszyny następuje w warunkach wyizolowanych, bez obciążenia siłami powstającymi podczas obróbki.



Rys. 2. Ogólny zakres kontroli bezpośredniej maszyn technologicznych
 Fig. 2. General scope of direct technological machines control

Korzystne jest zastosowanie metody pośredniej, polegającej na wyznaczeniu współczynników zdolności maszyny C_m i C_{mk} . Wpływ obciążenia siłami podczas obróbki jest uwzględniany z zastrzeżeniem, że dotyczy ono ściśle określonego obciążenia i przy obróbce podobnych wyrobów. Nie zapewnia ona możliwości szybkiego zdiagnozowania dominujących źródeł zakłóceń, natomiast dobrze nadaje się do stwierdzenia, czy dany produkt może być wytwarzany na maszynie z odpowiednią dokładnością. Istotnym problemem przy wyznaczaniu wskaźnika zdolności dla maszyny technologicznej są oddziaływania o charakterze nielosowym, jak np. zmieniająca się sztywność układu mechanicznego przy obróbce różniących się części, rodzaj narzędzia i podatność na zużycie, a także wpływy termiczne.



Rys. 3. Uwarunkowania przy kontroli pośredniej
 Fig. 3. Conditions of indirect control

Wyznaczanie wartości współczynników c_m , c_{mk} tylko w odniesieniu do jednego wyrobu daje zbyt mało informacji dla produkcji różnych wyrobów tymi samymi maszynami. Pełną informację dałoby przyporządkowanie danemu urządzeniu produkcyjnemu kilku wartości c_m dla typowych, ale wyraźnie zróżnicowanych elementów wytwarzanych. Można również rozważyć wyodrębnienie grupy cech, do których należy przypisać daną wartość c_m , np. grupy wymiarowej odchyłek kształtu, odchyłek kierunku oraz położenia.

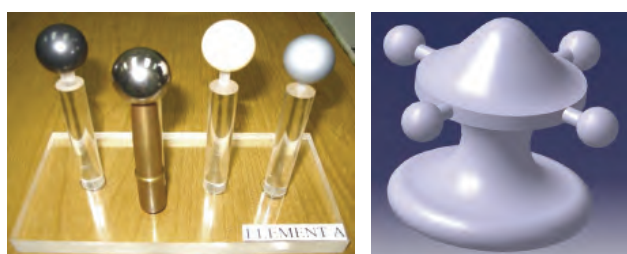
Ocena wskaźników zdolności maszyn lub procesów jest dodatkowo uzależniona od rodzaju rozkładu prawdopodobieństwa. Przyczyn występowania rozkładów innych niż normalny może być wiele. W odniesieniu do procesu produkcyjnego może to być efektem cykliczności pewnych systematycznych zmian, oddziaływania zakłóceń w formie trendu lub passy, nagłej zmiany poziomu wycentrowania urządzeń technologicznych, niestabilności warunków obróbki, czy też tolerowania jednostronnego (np. dla twardości materiału). W przypadku maszyny jest to zazwyczaj efektem zmian termicznych, zużycia narzędzia, zmian sztywności układu obróbkowego.

3. TOMOGRAFIA KOMPUTEROWA W MONITOROWANIU JAKOŚCI WYROBÓW

Jedną z metod oceny dokładności wykonania wyrobów jest wykorzystanie tomografii komputerowej (TK). Tomograf, oprócz wymiarów zewnętrznych badanego przedmiotu, umożliwia określenie wewnętrznej struktury obiektu. Najnowsze techniki obrazowania spiralną tomografią komputerową (STK) problem ten częściowo rozwiązują. Techniki STK nie pozwalają (z określoną niepewnością pomiaru) na jednoczesne wyznaczenie geometrii struktur badanych przedmiotów w całej przestrzeni pomiarowej. Niezależnie od obszaru zastosowania tomografii komputerowej, istotny jest problem dokładności odwzorowania mierzonego kształtu. Na Politechnice Krakowskiej został opracowany sposób oceny dokładności odwzorowania kształtu przy obrazowaniu STK z zastosowaniem przestrzennych wzorców walcowych i kulowych [11, 14].

Z uwagi na specyfikę pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem STK oraz fakt, iż w wielu przypadkach procedury kontroli jakości obejmują nie tylko rekonstrukcję 3D, ale również pomiary geometryczne, pozycjonowania, odległości czy objętości analizowanych części, zaproponowano ocenę dokładności odwzorowania kształtu opartą na analizie odtworzenia wzorców ceramicznych i polimerowych. Do rekonstrukcji 3D oraz oceny parametrów geometrycznych wykorzystano programy Femap Nastran i AutoCAD.

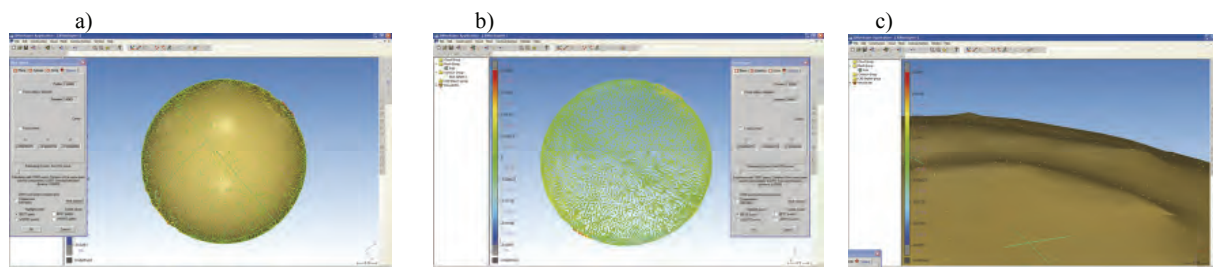
Dobór materiałów wzorców oparto na właściwościach pochłaniania promieniowania rentgenowskiego. Obraz tomograficzny jest tworzony na podstawie siatki wartości liniowego współczynnika osłabienia promieniowania rentgenowskiego, obliczonych dla poszczególnych elementów objętości badanego obiektu. Wartości te są zwykle podawane w znormalizowanych jednostkach HU (ang. HU – Hounsfield Units, tak że CT values, CT numbers). Przykłady wzorców kontrolnych zostały przedstawione na rys. 4. Kształt wzorców dobrano z uwagi na specyficzną kinematykę tomografów komputerowych oraz możliwość maksymalnego wyeliminowania błędów ustawienia przy metodzie sekwencyjnej oraz spiralnej.



Rys. 4. Przykładowe wzorce kontrolne do oceny dokładności

Fig. 4. Exemplary standards used for tomographs accuracy assessment

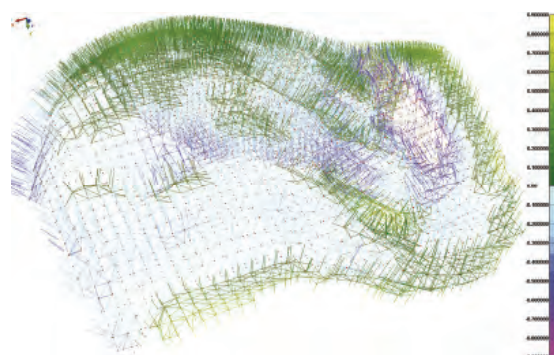
Do analizy wyników wykorzystano numeryczny obraz wzorca oraz programy: 3D Reshaper, Rhinoceros, AutoCad 2007, Microsoft Excel, Mimics. Po przeprowadzeniu segmentacji obrazów, o kreśleniu granic i krawędzi modeli otrzymanych z plików Dicom, otrzymano obrazy 3D modeli, które następnie poddano obróbce w programie Rhinoceros. Przykładowe wyniki pomiaru wybranych parametrów kontrolnych przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Porównanie zmierzonej kuli wzorcowej (a) z idealną sferą (b) oraz widok (c) kuli w obszarze około biegunowym
Fig. 5. Comparison of measured sphere (a) with ideal sphere (b) and view (c) of the sphere in field of the pole

Przeprowadzono także ocenę dokładności odwzorowania zarysu. Analiza ta wykazała, że np. przy odwzorowaniu zarysu ceramicznej kulki wzorcowej odchyłka kształtu okrągłości wyniosła 0,012 mm (średnia z 10 serii pomiarów przy rozstępie wyników od 0,01 mm do 0,015 mm). Ocenę odwzorowania kształtu powierzchni swobodnych, które są charakterystyczne dla wewnętrznych struktur wyrobów, przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch rodzajów tomografów: diagnostycznego i przemysłowo kalibracyjnego.

Do oceny dokładności odwzorowania kształtu zastosowano przestrzenny układ wektorów błędów charakteryzujących niedokładność wyznaczonej geometrii (rys. 6).



Rys. 6. Wektory błędów powierzchni wyrobu otrzymane z tomografu komputerowego
Fig. 6. Vectors of errors of product surface measured on Computer Tomograph

Przedstawiona koncepcja zapisu przestrzeni pola błędów pozwala na graficzne odwzorowanie wszystkich cech tego pola na płaszczyźnie. Charakterystyki błędów umożliwiają wskazanie obszarów, gdzie odwzorowanie kształtu na podstawie obrazowania TK może powodować potencjalne błędy, które wynikają z kształtu, a także z parametrów i procedury badania oraz lokalizacji obiektu w przestrzeni badawczej.

4. DOKŁADNOŚĆ I NIEPEWNOŚĆ POMIARÓW WSPÓLRZĘDNOŚCIOWYCH

Warunkiem zapewnienia wymagalnej i powtarzalnej jakości wyrobów jest nie tylko nowoczesna technologia wytwarzania, ale także dostosowane do niej systemy metrologiczne, gwarantujące zapewnienie zgodności wyrobu z jego geometryczną specyfikacją (GPS) oraz jego nadzorowanie (rys. 7). Kluczem do znaczenia ma obecnie współrzędnościowa technika pomiarowa (WTP) której podstawą są coraz dokładniejsze systemy i technologie pomiarów współrzędnościowych. Metrologia współrzędnościowa obejmuje zarówno pomiary makro, jak i mikro i nano wymiarów. W przypadku pomiarów makro wymiarów oznacza wymiary

stosowanie systemów laser trackerów, skanerów fotogrametrycznych, czy też dużych suwnicowych maszyn pomiarowych. Mikro wymiary wymagają zastosowania maszyn współrzędnościowych stykowych jak i bezstykowych. Nano wymiary to obecnie najtrudniejszy obszar wytwarzania, ale intensywnie rozwijany w systemach mechatronicznych oraz sprężenie mechanicznym i optycznym. Dla tego zakresu budowane są specjalne maszyny współrzędnościowe o rozdzielczości nanometrycznej, np. ISARA 400.



Rys. 7. Technologie pomiarowe w inżynierii produkcji
Fig. 7. Measuring technologies in production engineering

Zgodnie z wymogami technologicznymi wyniki pomiarów są tylko wtedy przydatne, gdy są podawane z określeniem ich dokładności. W przypadku WTP konieczna jest specjalistyczna wiedza, pozwalająca na określenie niepewności każdorazowo realizowanego pomiaru, co jest szczególnie trudne w warunkach przemysłowych. 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 wadą tych metod jest niezgodność z teorią pomiarów współrzędnościowych, w których przedmiotem bezpośredniego pomiaru nie jest długość, lecz współrzędna punktu na powierzchni przedmiotu mierzonego. Opracowana Metoda Macierzowa [14] pozwala na wyznaczenie dokładności WMP w określonych punktach referencyjnych. Przykład realizacji tej metody poprzez wykorzystanie laserowego systemu nadążnego został przedstawiony na rys. 8.



Rys. 8. Realizacja metody macierzowej z wykorzystaniem Laserowego Systemu Nadążnego LSW 840 Leica

Fig. 8. Realization of Matrix Method with the use of Lasertracker LTD840 Leica

Wyznaczanie niepewności pomiaru może odbywać się z wykorzystaniem obiektów wykalibrowanych. Istotną metodą wykorzystującą obiekt wykalibrowany – metodą porównawczą, jest przyjęcie zasady nieidentyfikowania przyczyn błędów, lecz przeprowadzenie ocen ich globalnych skutków na podstawie wyznaczenia odchyleń od wymiaru wzorcowego. W metodzie porównawczej WMP jest wykorzystywana jako komparator między niezbędnym tutaj wzorcem a mierzonym przedmiotem [14,16]. Warunki komparacji podano w tabeli 1.

Tabela. 1. Dopuszczalne odchylenia w metodzie porównawczej [16]

Rozpatrywany parametr	Dopuszczalna różnica między wzorcem a mierzonym przedmiotem oraz warunki realizacji pomiarów
Wymiary geometryczne	±10 % długości lub ±25 mm (wybór większej z nich) ±5° orientacji katowej
Materiał musi	być identyczny
Strategia pomiaru	musi być identyczna
Konfiguracja głowicy musi	być identyczna
Siła pomiarowa w punkcie styku	±20 %

W praktyce ta metoda wymaga skomplikowanych systemów zapewniających stabilne warunki realizacji pomiarów i maszyny o dużej dokładności, gdyż nie jest opłacalne stosowanie WMP, którą należałoby często ponownie kalibrować. Stąd główne zastosowanie metody porównawczej to masowa kontrola sprawdzianów, realizowana w specjalnych laboratoriach kalibracyjnych – centrach pomiarowych. Metoda ta może też być wykorzystywana w produkcji wielkoseryjnej. Dla produkcji małoseryjnej i jednostkowej złożonych geometrycznie przedmiotów metoda ta jest praktycznie nieprzydatna.

Niepewność pomiarów może być oceniana z wykorzystaniem niewykalibrowanych obiektów pomiarowych z wielokrotnie powtarzaną strategią pomiarową. Na podstawie tego pomiaru są wyznaczone następujące parametry niepewności: u_{rep} niepewność uzyskanej powtarzalności pomiaru związanej z pomiarem tego samego elementu w różnych orientacjach oraz u_{geo} składowa niepewności związana z różnicami, jakie uzyskamy w przypadku pomiaru obiektu dla różnych orientacji.

Obie składowe niepewności są wystarczające do wyznaczenia niepewności błędu kształtu lub kąta elementu mierzzonego. W przypadku pomiarów długości lub pozycji potrzebne jest wyznaczenie dodatkowych składowych niepewności pomiaru. W takim przypadku dokonywany jest pomiar wykalibrowanego wzorca długości i wyznaczana jest wartość błędu systematycznego E_L . Następnie wylicza się składową niepewności U_{corr} związaną z korekcją średniego błędu długości.

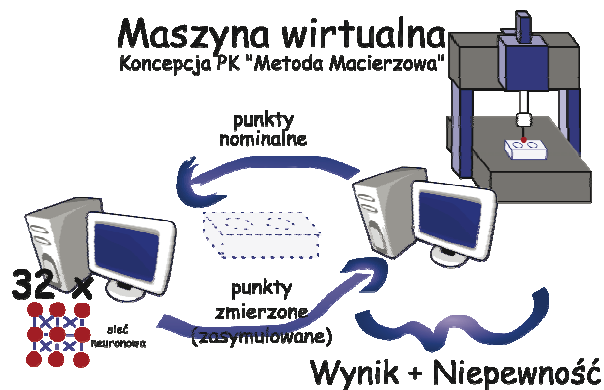
Dodatkowymi składowymi jakie mogą być wyznaczone podczas wyznaczania niepewności tego rodzaju pomiaru to składowe związane z pomiarem stykowym WMP E_D wyznaczana w podobny sposób jak E_L . W tym przypadku jest mierzony pierścień wzorcowy oraz kula kalibracyjna. Składowa E_D jest określona przez większą z obu wartości. Drugą jest niepewność wyznaczenia odpowiednich parametrów U_D określona w podobny sposób jak U_{corr} . Kolejnym parametrem może być wyznaczenie wpływu korekcji temperatury na pomiar.

Ostatecznie równanie niepewności przyjmie następującą postać:

$$u = |E_D| + |E_L| + k \sqrt{u_{rep}^2 + u_{geo}^2 + u_{corr}^2 + u_D^2 + u_{temp}^2} \quad (1)$$

gdzie k jest współczynnikiem rozszerzającym równanie niepewności na odpowiedni stopień ufności.

Na podstawie prac [14, 15, 16] można stwierdzić, że zadanie oceny dokładności dowolnego pomiaru realizowanego na WMP może być skutecznie rozwiązane metodą symulacji pomiarów i określenia dla nich błędów z zastosowaniem kopii wirtualnej, ocenianej przez WMP. Kopia wirtualna powinna możliwie wiernie odtwarzać zachowanie metrologiczne maszyny. W Politechnice Krakowskiej zbudowano modele wirtualne wielu maszyn pomiarowych. Błędy składowe zidentyfikowano w oparciu o pomiary z wykorzystaniem płyty kulowej i oprogramowania Kalkom [15]. Na podstawie tych opracowano nowy, komputerowy model realizujący wirtualną WMP (w ramach projektu PB1367/T07/95/08). Najnowszy model, Laserowy Wzorzec Stopniowy, jest dedykowany do maszyn o dużych zakresach pomiarowych.



Rys. 9. Konceptja VCMM PK opracowana w PK z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych i Metody Macierzowej

Fig. 9. Virtual CMM PK made by CUT with the use of neural network and Marix Method

Najnowszą koncepcją maszyny wirtualnej (rys. 9) jest model Virtual Neuro CMM [14] pozwalający na wyznaczenie błędów WMP z wykorzystaniem różnych orientacji i pozycji płyty kulowej jako podstawy budowy siatki punktów retencyjnych i Metody Macierzowej.

W Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej opracowano tak że system oparty na koncepcji pomiarów hybrydowych: Opto-Mechanical Measurement Machine (OMMM). Pozwala to na pomiar wytwarzanych części maszyn na wet ze 100 % modelem kontroli. Naturalnym odbiorcą tej metody jest produkcja seryjna przemysłu motoryzacyjnego, AGD czy elektroniki użytkowej. Model niepewności pomiaru realizowany z wykorzystaniem systemu OMMM uwzględnia zarówno niepewność pomiaru WMP jak i problem dokładności systemu skanera wykorzystującego światło strukturalne, gdzie istotną rolę odgrywa zagadnienie refleksyjności mierzonej powierzchni i jej relacji w stosunku do refleksyjności powierzchni wzorców użytych do kalibracji systemu.

Należy podkreślić, że istotną rolę w przypadku oceny niepewności pomiarów odgrywa nadzorowanie błędów wskazania systemu współrzędnościowego. W ramach projektu badawczo rozwojowego Nr R03 029 01 został opracowywany system nadzoru dokładności systemów współrzędnościowych, wykorzystujący wzorce przestrzenne typu Tetraedr. System ten w założeniu jest powiązany z europejskim systemem nadzoru, opracowanym w ramach projektu TRACES.

5. ZASTOSOWANIE SYSTEMÓW WIZYJNYCH

Rolą systemu wizyjnego jest wyeliminowanie operatora z konieczności ciągłego nadzoru nad realizowanym procesem. Zadaniem systemu wizyjnego jest lokalizacja obiektu, ustalenie orientacji obiektu, rozpoznanie obiektu. [7, 8, 9]. Za pomocą systemów wizyjnych można tak że dokonywać np.: identyfikacji i sortowania wyrobów; oceny stanu wyrobów; określenia punktów, w których można uchwycić wyrób; określenia miejsca, w którym można element umieścić; kontroli trajektorii ruchomych obiektów w celu wykrycia zagrożeń kolizji

oraz chwytania ruchomych elementów; zewnętrznego nadzoru nad przestrzenią roboczą; sterowania robotami lub gniazdami obróbczymi.

Systemy wizyjne są stosowane do identyfikacji stanu obiektów – wyrobów i urządzeń technologicznych. Obiekty podlegające rozpoznawaniu mogą mieć różny charakter. Zunifikowane podejście do metod rozpoznawania jest możliwe dzięki temu, że jako wstępny etap procesu wymienia się zwykle po miarę cech opisujących rozpoznawane obiekty, a dalsze postępowanie polega wyłącznie na analizowaniu tych cech, bez powracania do oryginalnego obiektu.

Najbardziej rozpowszechnione są metody minimalno-odległościowe. W metodach tych funkcję przynależności wiążącą się z pojęciem odległości oświadcza w przestrzeni cech, co z jednej strony pozwala łatwo wyobrazić sobie istotę proponowanych metod, a z drugiej strony prowadzi do stosunkowo dobrej jakości rozpoznawania. Pewną odmianą metod minimalno-odległościowych są metody wzorców. Istnieje też podejście probabilistyczne. Obiekty i ich cechy są traktowane przy tym podejściu jak obserwacje statystyczne, a sam proces rozpoznawania upodabnia się do procesu weryfikacji hipotez statystycznych. Współczesnym kierunkiem badań w zakresie zastosowań metod sztucznej inteligencji w systemach wizyjnych są sieci neuronowe.

Zastosowanie systemów wizyjnych w wyposażeniu robotów umożliwia: polepszenie jakości produktu dzięki możliwości 100 % kontroli części i operacji, zwiększenie wydajności, zmniejszenie odpadów i lepsze wykorzystanie materiału, zmniejszenie kosztów serwisu, ograniczenie ilości koniecznych stanowisk ręcznej kontroli w wyrobie, zmniejszenie bezproduktywnego zużycia narzędzi. Najczęstsze zastosowania systemów wizyjnych to:

- **kontrola wymiarów** – można sprawdzać automatycznie, czy wymiary kolejnych części mieszczą się w granicach tolerancji. Dotyczy to pomiaru średnic, odległości, promieni, kątów bądź nierówności powierzchni. System wizyjny pozwala np. sprawdzać wymiary i kąty po połączeniu elementów za pomocą zgrzewania lub spawania.
- **kontrola montażu** – można kontrolować prawidłowe złożenie części, czy wszystkie części są usytuowane we właściwych miejscach. Tu przykładami mogą być: wkręcenie śrub, umieszczenie nakrętek, podkładek, nitów, kulek w łożyskach, a także przygotowanie części do zgrzewania, spawania, lutowania oraz dokonanie kontroli po połączeniu.
- **kontrola kompletności** – można sprawdzać czy umieszczono wszystkie części i czy znajdują się we właściwych pozycjach. Przykładami mogą być osadzenie układów scalonych w podstawkach, umieszczenie złączy, ustawienie przełączników, umieszczenie butelek w pojemnikach plastikowych, albo różnych artykułów w pudełkach.
- **kontrola pakowania** – można sprawdzać zgodność pakowanych części, lub zgodność wyrobów (także naklejek, wzorców, itp.) ze specyfikacją.
- **identyfikacja części** – może być stosowana do sprawdzania prawidłowości kompletacji zestawów różnych elementów, części, produktów we wspólnym opakowaniu.
- **rozpoznawanie znaków** – może obejmować odczytywanie lub sprawdzanie napisów na produktach, jak np. napisu daty zdolności do spożycia na opakowaniach żywności i napojów, numerów na częściach metalowych, opisów produktu na plastikowych wyrobach ciągłych (rurach, kablach), znaków kontroli technicznej.
- **kontrole złożone** – mogą obejmować kilka zadań realizowanych na jednym stanowisku, np. jednoczesne rozpoznanie pozycji i typu elementu, bądź połączenie kontroli wymiarów i oznaczeń.

Niezawodność przemysłowych systemów wizyjnych jest między innymi i zależy od dokładności lokalizacji obiektu na obrazie reprezentującym rozważaną cechę. Przez lokalizację rozumie się możliwość podania współrzędnych opisujących położenie obiektu

(ściślej, wybranego charakterystycznego punktu obiektu) w przyjętym układzie odniesienia 2D lub 3D. Istotna jest też szybkość działania systemu wizyjnego (w czasie rzeczywistym), co narzuca określone wymagania na stosowane algorytmy. Dlatego uzasadnione jest stosowanie rozwiązań sprzętowych, np. stosowanie do tego celu specjalizowanych procesorów wizyjnych. Ze względu na stosunkowo wysoki koszt takiego rozwiązania uzasadnione jest także opracowanie odpowiednich programów, dokonujących lokalizacji obiektów na obrazie. Zaletą takiego rozwiązania jest niższy koszt i duża elastyczność; ograniczeniem jest jednak znaczne wydłużenie czasu reakcji układu w stosunku do rozwiązań sprzętowych.

Ważnym etapem w systemach w systemach wizyjnych jest **analiza obrazu**. Jest to proces polegający na wyodrębnieniu z całościowej informacji docierającej do obserwatora tej części, która jest istotna z punktu widzenia użytkownika lub procesu. Towarzyszy temu bardzo radykalna redukcja ilości informacji. Analizę należy poprzedzić odpowiednim przetworzeniem obrazu. Celowym jest wyodrębnienie podstawowych grup przekształceń, tj.: geometrycznych; punktowych (bezkontekstowych); kontekstowych (filtry konwolucyjne, logiczne i medianowe); widmowych (wykorzystujących transformację Fouriera); morfologicznych.

Wyniki analizy, niezależnie od rodzaju mierzonych parametrów, mogą być zapisane w pamięci komputera i analizowane za pomocą dowolnych programów statystycznych i arkuszy kalkulacyjnych. Dzięki temu, po przeprowadzeniu przez system analizy obrazu można otrzymane wyniki przetwarzać w dowolny sposób, wyznaczając np. nowe, złożone parametry lub sumować informacje pochodzące z serii pomiarów, lub też analizować je z punktu widzenia przyjętych kryteriów. Analiza obrazów może być wykorzystana w pomiarach wielkości geometrycznych. Pomiarom podlegają mogą dwie kategorie wielkości:

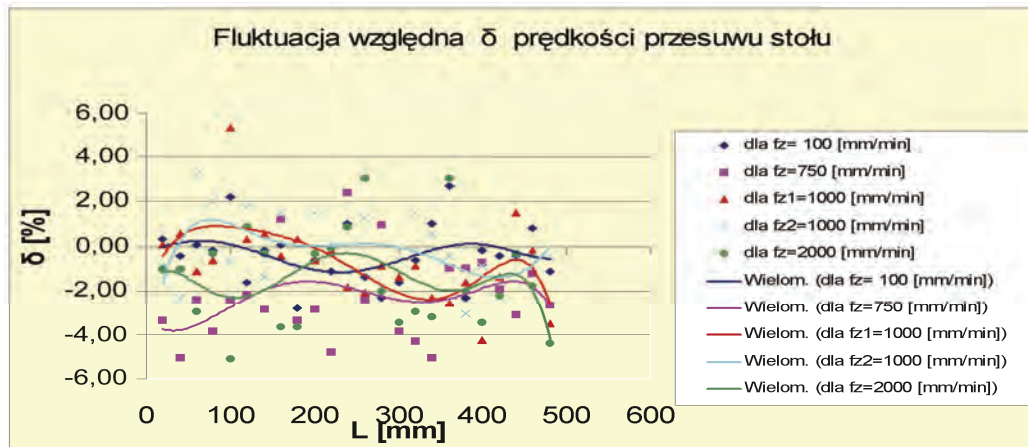
- parametry lokalne, które opisują pewien uśredniony element obrazu. Przykładem jest średnia powierzchnia lub średnica obiektu, średnia krzywizna brzegu, średni moment bezwładności, itp.
- parametry globalne, opisujące cechy grup obiektów lub innych elementów obrazu. Są one zawsze wielkościami względnymi; na przykład ilość obiektów na jednostkę powierzchni długości. Przykładami takich parametrów mogą być: liczba obiektów na jednostkę objętości lub powierzchni, udział powierzchniowy wybranych elementów obrazu, długość linii na jednostkę pola powierzchni obrazu.

W ramach prowadzonych prac wykonano systemy do analizy wymiarowo-kształtowej oraz oceny jakości wyrobów z zastosowaniem kamer CCD i układów laserowych. Należą do nich systemy: analizy parametrów geometrycznych, błędów kształtu i połączenia elementów maszyn; analizy dokładności wykonania elementów o skomplikowanych, nieregularnych kształtach; analizy procesu technologicznego ze względu na dokładność geometryczną wyrobu oraz ocenę poprawności doboru parametrów skrawania i kontrolę wiórow, monitorowania i czynnej kontroli geometrii oraz jakości wykonania spoin zgrzewczych ramieniennych.

Przykład przeprowadzonych pomiarów z zastosowaniem interferometru laserowego i kamer CCD w procesie frezowania przedstawiono na rys. 10. Wskaźnik syntetyczny, określający wpływ nieprostoliniowości przesuwu stołu [wskaźnik A] i fluktuację prędkości stołu obrabiarki [wskaźnik B] na błąd falistości powierzchni wykonywanych przedmiotów, z uwzględnieniem: prostoliniowości przesuwu stołu obrabiarki podczas obróbki; fluktuacji prędkości stołu podczas obróbki; profilu falistości powierzchni przedmiotu kontrolnego; funkcji korelacji pomiędzy falistością powierzchni a prostoliniowością przesuwu i fluktuacją prędkości; różnych wartości prędkości posuwu roboczego przedstawiono na rys. 11. Wskaźnik syntetyczny określa jako cechę systemu wytwórczego, wpływ nieprostoliniowości przesuwu

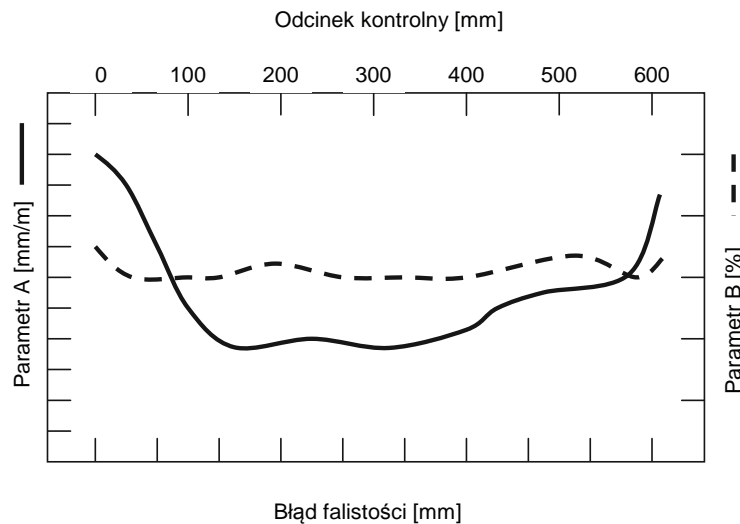
stołu i fluktuację prędkości stołu obrabiarki na błąd falistości powierzchni obrabianego przedmiotu kontrolnego. Na podstawie przeprowadzonych badań i otrzymanych charakterystyk można wnioskować, iż formowanie powierzchni przedmiotu na długości odcinka kontrolnego przebiega w trzech etapach:

etap I – następuje stabilizacja parametrów technologicznych; etap II – przedział pracy stabilnej; etap III – niestabilna praca mechanizmu przesuwu stołu.



Rys. 10. Fluktuacja względna prędkości stołu podczas frezowania
 Fig. 10. Fluctuation of the relative speed of the table during milling

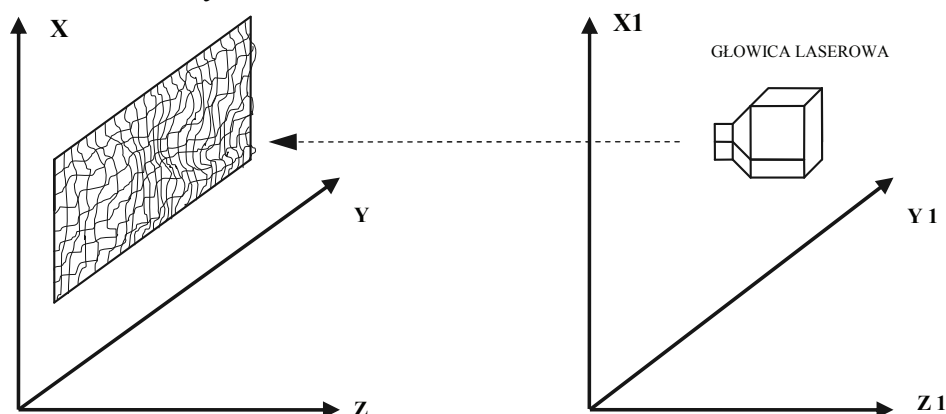
Jak wynika z analizy, w etapie I i III większy wpływ na błąd falistości wywiera fluktuacja prędkości przesuwu stołu, natomiast wpływ nieprostoliniowości przesuwu nie wykazuje znaczących różnic w poszczególnych fazach obróbki.



Rys. 11. Syntetyczny wskaźnik jakości układu obróbkowego
 Fig. 11. Synthetic index of quality of machining system

Wyznaczenie kształtu rzeczywistego realizowano poprzez pomiar położenia punktów charakterystycznych, wyznaczających kształt w układzie kartezjańskim lub biegunowym. Do pomiarów zastosowano dalmierz cyfrowy zbudowany na bazie interferometru laserowego. Dyskretyzację i skanowanie kontrolowanej powierzchni zapewniał stolik z zespołem przesuwным X-Y. Specjalne układy optyczne umożliwiły pomiar bezstykowy w trzech zakresach, zależnie od wielkości przedmiotu i nieregularności zarysów kształtu przedmiotu oraz stopnia refleksyjności badanej powierzchni. Na podstawie otrzymanych wyników utworzono obraz przedmiotu w układzie 3D, a następnie obliczono wartości odchyłek kształtu dla przyjętych punktów charakterystycznych.

Realizacja pomiarów geometrycznych, pozycjonowania lub kształtu polega na wyborze punktów charakterystycznych na badanym profilu, zgodnie z przyjętą strategią pomiarową i wyznaczeniu współrzędnych X Y Z tych punktów. Schemat układu pomiarowego i zasadę działania przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Zasada pomiaru kształtu poprzez wyznaczenie współrzędnych punktów charakterystycznych
Fig. 12. Principle of the shape measurement through outlining coordinates of characteristic points

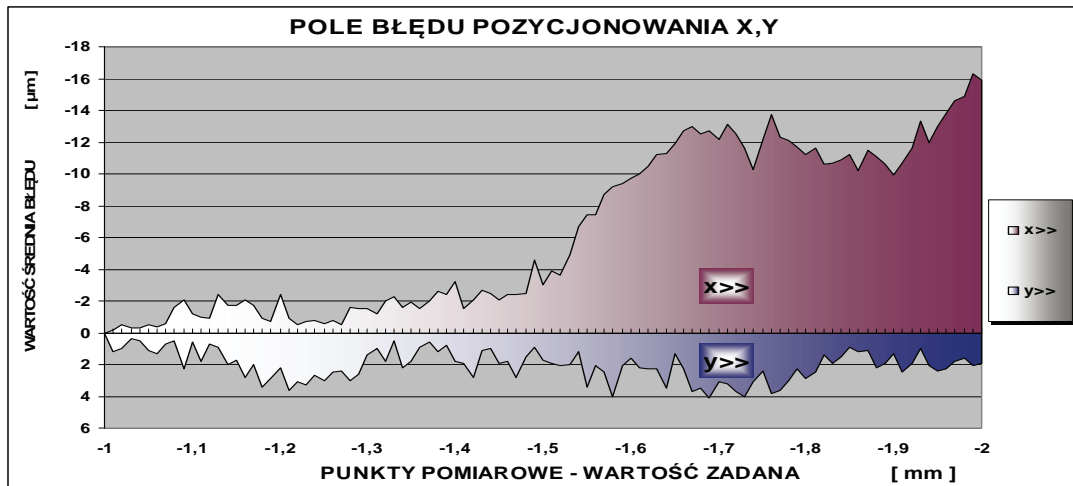
Układ pomiarowy składa się z bloku pozycjonowania – wyznaczającego współrzędne X i Y wybranych punktów kontrolnych oraz dalmierza laserowego określającego współrzędną Z. Blok pozycjonowania, najczęściej stolik koryzowy o podwyższonej dokładności, może być związany z głowicą laserową lub badanym przedmiotem. W omawianym przypadku blok pozycjonowania był związany był z przedmiotem badanym. Jako blok dalmierza bezstykowego wykorzystano interferometr laserowy z głowicą laserową. Badana powierzchnia była skanowana w przekrojach o dobranym kroku dyskretyzacji. Wyniki pomiarów, tj. współrzędne punktów skanowania (x_i, y_i, z_i), były automatycznie rejestrowane i przesyłane w formie odpowiednich plików do programu graficznego.

W przypadku przedmiotów z powierzchniami badanymi i o odpowiednim stopniu refleksyjności, w układach optycznych za interferometrem sytuuje się soczewkę skupiającą wiązkę laserową, umożliwiającą jej odbicie od badanej powierzchni.

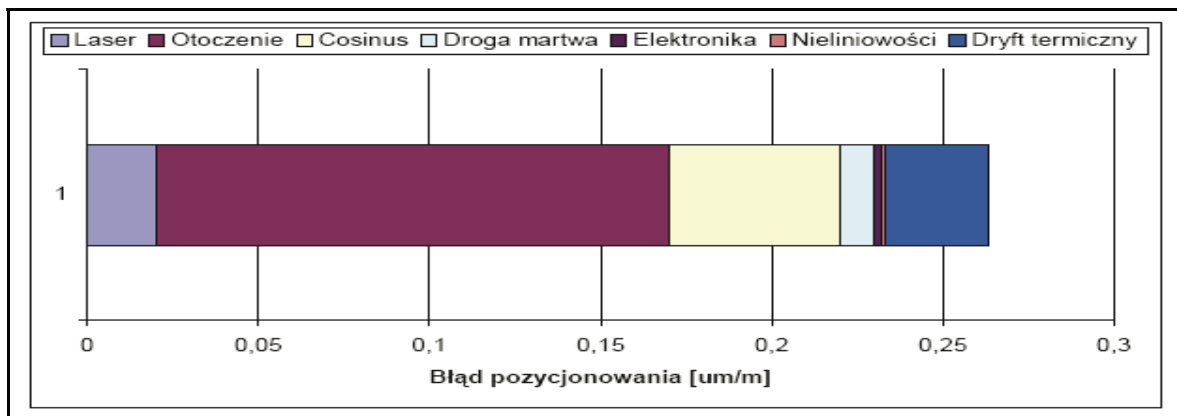
Przeprowadzono pomiary pozycjonowania w osiach X i Z zastosowaniem interferometru laserowego. Przykładowe charakterystyki błędów pozycjonowania stolika krzyżowego przedstawiono na rys. 13. Zbiorczy bilans błędów tego typu układów przedstawiono na rys. 14. Z powyższego zestawienia wynika, że dominujące znaczenie mają fluktuacje parametrów otoczenia oraz niedokładność wyjustowania układu pomiarowego.

Aplikacja zaproponowanego systemu polegała na zbadaniu nieregularności kształtu powierzchni roboczej zaworu i na tej podstawie opracowania zaleceń do skorygowania procesu technologicznego. Wyznaczono obszar pomiarowy z dyskretyzacją co 0,01 mm.

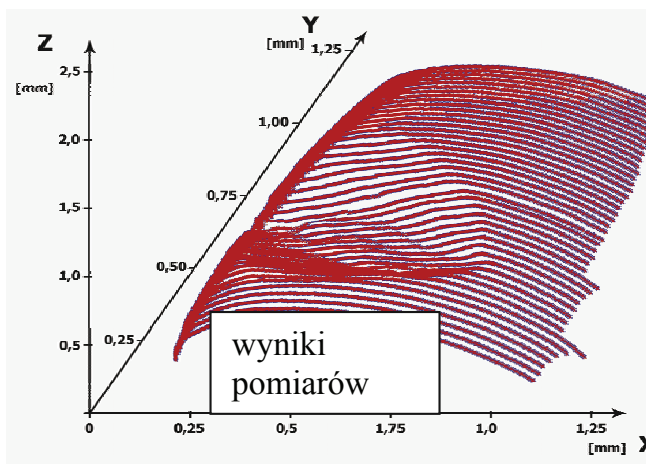
Przeprowadzone badania umożliwiły wyznaczenie miejsca występowania nieregularności zarysu w przedmiocie badanym (rys. 15) oraz określenie wielkości tej nieregularności w układzie 3D.



Rys. 13. Pola błędu pozycjonowania dla osi X i Y dla zakresu od 1 mm do 2 mm
 Fig. 13. Diagram of the average scope of fault in positioning for the X-axis and Y-axis for the scope from 1 mm to 2 mm



Rys. 14. Zbiorcze zestawienie wybranych błędów pomiaru układami laserowymi
 Fig. 14. Overall table of chosen faults of the measurement with laser systems



Rys. 15. Przykład nieregularności zarysu badanego elementu w wybranym przekroju
 Fig. 15. Irregularity example of the examined outline of the element in the chosen section

7. PROGNOZOWANIE STANU SYSTEMÓW OBRÓBKOWYCH

Monitorowanie stanu urządzeń technologicznych i procesu wytwarzania pozwala uzyskać informację o bieżącym przebiegu procesu. Prognozowanie daje podstawę do wnioskowania, z określonym prawdopodobieństwem, o przyszłych warunkach kształtowania jakości technologicznej wyrobu na podstawie przewidywanych charakterystyk procesu wytwarzania. Pod pojęciem „stan systemu obróbkowego” należy rozumieć zbiór wartości parametrów systemu w analizowanym przedziale (lub w określonym momencie) czasu.

Zadanie prognozowania stanu układów obróbkowych można sformułować następująco: na podstawie wartości wskaźników charakteryzujących stan systemu obróbkowego w określonym przedziale czasu pracy systemu $[0-t]$ (np. historia zużycia ostrza), wyznaczyć przebieg zmiany wartości parametrów z wyprzedzeniem czasowym $m\Delta t$ (przy czym: $m = 1, 2, \dots, j$), zaś Δt jest założonym krokiem czasowym prognozy. Wyboru metody prognozowania dokonuje się przyjmując za podstawę zbiór danych o przebiegu procesu eksploatacji systemu [5, 6]. W zależności od charakteru i przebiegu procesu eksploatacji można wyróżnić trzy podstawowe metody, tj.:

- interpolację wartości wskaźników procesów deterministycznych;
- prognozowanie wartości wskaźników losowych procesów stacjonarnych;
- prognozowanie wartości wskaźników losowych procesów niestacjonarnych.

Istnieje wiele metod rozwiązywania zadania prognozowania [3, 5, 17], w tym także prognozowania stanu systemów obróbkowych. Można je sprowadzić do:

- metody ocen ekspertowych,
- metody ekstrapolacji,
- metody matematycznego modelowania,
- metody sztucznej inteligencji (sieci neuronowe, algorytmy ewolucyjne)

Ze względu na celowość bezpośredniego powiązania wyników prognozy z możliwością sterowania urządzeniami technologicznymi, szczególnie preferowane są te metody, które umożliwiają wyznaczenie konkretnych wartości parametrów procesu (np. matematyczne modelowanie, sieci neuronowe, sieci neuronowe w połączeniu ze zbiorami rozmytymi). Przykładem jest zadanie prognozowania wartości wskaźników procesu „ciężkiego zużycia” ostrzy, które można rozwiązać łącząc metody matematycznego modelowania z wykorzystaniem teorii wyrównywania wykładniczego i metody porównującego trendu [5]. Przrost wartości wskaźnika zużycia VX ostrza można przedstawić jako dyskretny proces losowy, w którym daje się wyróżnić składową deterministyczną VX_d oraz składową losową VX_s :

$$VX = VX_d + VX_s \quad (2)$$

Rozwiązanie zadania prognozowania sprowadza się do wyznaczenia wartości VX_{k+m} odległej od ostatniej zmierzonej wartości VX_k o odległość $m\Delta t$. Dane wyjściowe do prognozy zużycia tworzy zbiór wartości VX_i ($i = 1, 2, \dots, k$), wyznaczonych w czasie skrawania poprzedzającym prognozę. Zaletą proponowanej metody wyrównywania wykładniczego jest stosunkowo niewielka liczba punktów pomiarowych, niezbędnych do wyznaczenia prognozy. Wystarcza bowiem już 3–5 punktów; należy jednak pamiętać, że prognoza nie powinna również wykroczyć poza przedział czasowy $(3-5) \Delta t$.

Matematyczny model zmiany wartości wskaźnika można przedstawić w postaci:

$$dVX = C_1(VX_g - VX) I(t)dt \quad (3)$$

przy czym : VX_g – graniczna wartość wskaźnika zużycia ostrza, do której zmierzalaby prognozowana wartość VX_{k+m} , jeśli $t \rightarrow \infty$;

$I(t) = \frac{dVX}{dt}$ – intensywność zużycia ostrza (czas t może występować w postaci jawnej lub np. jako długość drogi skrawania); powinien być również spełniony warunek początkowy $VX(t_0) = VX_0$;

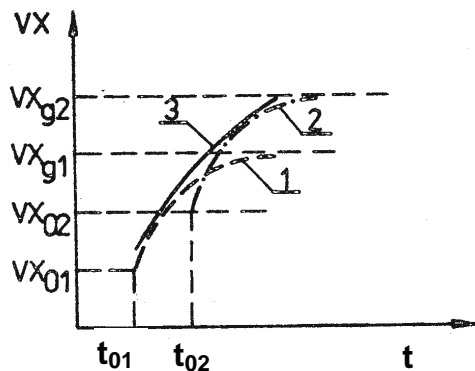
C_1 – stała, wynikająca z dopasowania jednostek.

Na podstawie przeprowadzonych badań wartość graniczna VX_g daje się wyznaczyć z zależności:

$$VX_g = VX_k + \beta I_k(t) \Delta t_{k+1} v_k \quad (4)$$

przy czym : β – współczynnik, zależny od warunków pracy ostrza; $I_k(t)$ – intensywność zużycia ostrza w przedziale czasu Δt_k poprzedzającym prognozę; v_k – prędkość skrawania w przedziale czasu Δt_k ; Δt_{k+1} – przedział czasu dla pierwszej prognozy ($m = 1$).

Szczegółowy tok obliczeń zależy od przyjętego matematycznego modelu do wyznaczenia prognozy, będącego wynikiem rozwinięcia k -tej zmierzanej wartości VX_k w szereg Taylora. Zasadę wyznaczania prognozy wskaźnika zużycia VX , wykorzystującą ideę pełzającego trendu, przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16. Zastosowanie zasady pełzającego trendu do wyznaczania przebiegu wskaźnika zużycia ostrza VX w dwóch kolejnych cyklach prognozy
 Fig. 16. Application of the concept of creeping trend for determination of the rule of blade wear indicator VX in two successive cycles of forecasts

przy czym:

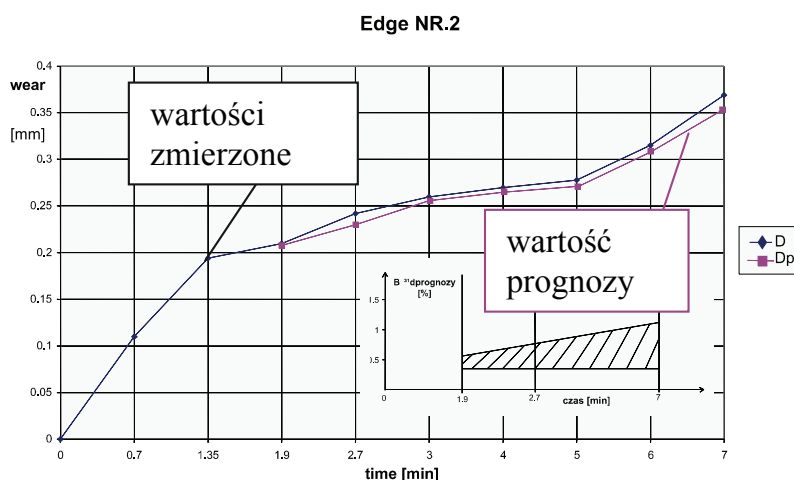
- VX_{01}, VX_{02} – początkowe wartości wskaźnika VX dla pierwszej (1) i drugiej (2) prognozy;
- VX_{g1}, VX_{g2} – analogicznie graniczne wartości wskaźnika VX ; 1 – pierwsza prognoza; 2 – druga prognoza; 3 – obwiednia przedstawiająca przebieg wskaźnika VX w przedziale czasu skrawania $2\Delta t$ objętym prognozą

Względny błąd prognozy (δ), wyznaczony z zależności (5), nie przekracza wartości 6–8 %.

$$\delta = \left| \frac{VX(t_m) - VX_{k+m}}{VX(t_m)} \right| 100 \% \quad (5)$$

przy czym: $VX(t_m)$ – wartość wskaźnika zużycia ostrza p o czasie skrawania $t_m = t_k + m\Delta t$; t_k – czas skrawania do osi ągnięcia zużycia VX_k (ostatnia zmierzona wartość wskaźnika zużycia przed wyznaczeniem prognozy).

Przykład przebiegu zmierzanej i prognozowanej wartości wskaźnika zużycia VB ostrza na powierzchni przyłożenia przedstawiono na rys. 17.

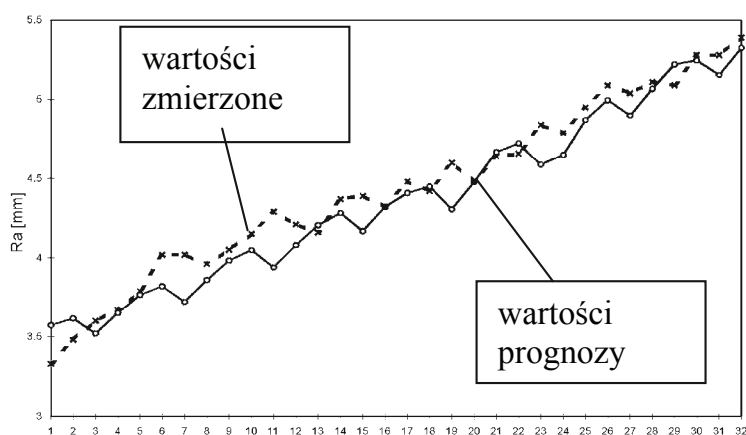


Rys. 17. Przebieg wskaźnika zużycia VB ostrza z węgla P30S podczas skrawania stali 45 ($R_m = 700$ MPa); $v_c = 200$ m/min; $f = 0,25$ mm/obr; $a_p = 2$ mm

Fig. 17. Mileage wear indicator VB carbide blade P30S when cutting steel 45 ($R_m = 700$ MPa); $v_c = 200$ m/min; $f = 0,25$ mm/obr; $a_p = 2$ mm

W Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Krakowskiej został także opracowany algorytm prognozowania wskaźników zużycia ostrzy narzędzi z zastosowaniem sieci neuronowych [5]. Wielkościami wejściowymi sieci są: HB – twardość przedmiotu obrabianego, v_c , f , a_p – prędkość, posuw i głębokość skrawania, t – czas skrawania, F_f , F_p , F_c – składowe siły skrawania, AE_{RMS} – wartość skuteczna sygnału emisji akustycznej, Δt – czas wyprzedzenia prognozy.

Zastosowanie sieci neuronowych do prognozowania zużycia ostrzy narzędzi skrawających stwarza tak że możliwości nadzoru jako ści technologicznej wyrobów w procesie skrawania (rys. 18).



Rys. 18. Prognozowanie zmiany chropowatości powierzchni w procesie skrawania

Fig. 18. Forecasting changes in surface roughness in the cutting process

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aliidi G.: Sicherer Bohrprozess dank Überwachung. Schweizer Maschinenmarkt 05 2009, s. 40–43.
- [2] Bourne K.A., Jun M.G., Kapoor S.G., De Vor R.E.: An Acoustic Emission-Based Method for Determining Contact between a Tool and Workpiece at the Microscale. Journal of Manufacturing Science and Engineering. June 2008 Vol. 130/031101-1-8.
- [3] Dutta R.K., Paul S., Chattopadhyay A.B.: The efficacy of back propagation neural network with delta learning in predicting the wear of carbide inserts in face milling. Int J Adv Manuf Technol (2006) 31, pp. 434–442.
- [4] DRYCZ B.: Zarządzanie jakością, tom I, Jakość i systemy zapewnienia jakości. Praca zbiorowa pod redakcją A. Tabora, A. Zajęca i M. Rączki, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 1999.
- [5] Gawlik J., Karbowski K.: Matematyczne modelowanie procesu zużycia narzędzi skrawających. Nadzorowanie stanu narzędzi. Prace Naukowe Politechniki Krakowskiej. Seria Mechanika. Monografia 231, Kraków 1998.
- [6] Gawlik J.: Nadzorowanie systemów wytwarzania. Inżynieria maszyn. R. 6 z. 2, 2001, s. 102–117.
- [7] Gawlik J., Ryniewicz A., Siomka A.: Laserowe układy pomiarowe i kamery CCD w systemach oceny maszyn i jakości wyrobów. Mechanik 11/2003, s. 643–647.
- [8] Gawlik J., Ryniewicz A.: Strategie i systemy wielofunkcyjnej oceny jakości urządzeń technologicznych. Inżynieria maszyn. Vol. 9, z. 3–4, 2004, s. 35–48
- [9] Gawlik J., Ryniewicz A., Siomka A.: The Strategies and Methods of Measurement in Multifunctional Quality Inspection. VDI-Berichte 1860, VDI Verlag GmbH, Duesseldorf-Erlangen 2004, s. 649–662.
- [10] Khalifa O.O., Densibali A., Faris W.: Image processing for chatter identification in machining processes. Int J Adv Manuf Technol (2006) 31, pp. 443–449.
- [11] Ryniewicz A.: Analiza dokładności odwzorowania kształtu powierzchni roboczych białozysk z zastosowaniem wzorców przestrzennych i modeli odwrotnych. Projekt badawczy nr 4083/B/T03/2008/34. Politechnika Krakowska, 2010.
- [12] Senatore J., Monies F., Landon Y.: Optimizing positioning of the axis of a milling cutter on an offset surface by geometric error minimization. Int J Adv Manuf Technol (2008) 31, pp. 861–871.

-
- [13] Shahabi H.H., Ratman M.M.: On-line monitoring of tool wear in turning operation in the presence of tool misalignment. *Int J Adv Manuf Technol* (2008) 38, pp. 718–727.
- [14] Sładek J.: Modelowanie i ocena dokładności maszyn oraz pomiarów współrzędnościowych, Monografia Politechnika Krakowska. Kraków, 2001
- [15] Trapet E.: Traceability of Coordinate Measurements According to Method of Virtual Measuring Machine. PTB F-35, Braunschweig 1999.
- [16] Trapet E., Wäldele F.: Substitution method to make traceable measurements with CMMs. Working paper ISO/TC3/WG10, 1996.
- [17] Yao-Wen Hsueh, Can-Yun Yang: Prediction of tool breakage in face milling using support vector machine. *Int J Adv Manuf Technol* (2008) 37, pp. 872–880.