

Jerzy SŁADEK, Marcin KRAWCZYK

POLITECHNIKA KRAKOWSKA, KATEDRA INŻYNIERII PROCESÓW PRODUKCYJNYCH, ZESPÓŁ METROLOGII WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWEJ

Dokładność maszyn i pomiarów współrzędnościowych - metody wyznaczania niepewności pomiaru

Dr hab. inż. Jerzy SŁADEK
prof. Politechniki Krakowskiej

specjalista w dziedzinie metrologii współrzędnościowej, autor kilkudziesięciu publikacji z tej dziedziny. Twórca Metody Macierzowej oceny dokładności WMP. Po raz pierwszy zastosował sztuczne sieci neuronowe do modelowania dokładności pomiarów współrzędnościowych.

e-mail: sladek@mech.pk.edu.pl



mgr inż. Marcin KRAWCZYK

doktorant Politechniki Krakowskiej, stypendysta Phisikalish-Technische Bundesanstalt w Braunschweig w sekcji metrologii współrzędnościowej. Autor Laseroowego Wzorca Stopniowego i metody jego zastosowania do identyfikacji błędów WMP. Od wielu lat prowadzi szkolenia w zakresie programowania WMP w systemach QUINDOS i PC-DMIS.

e-mail: mkrawczyk@wp.pl



Streszczenie

W artykule zaprezentowano relację pomiędzy błędami granicznymi maszyn pomiarowych a dokładnością pomiarów, przyjmując miarę dokładności w postaci obliczonej i szacowanej niepewności pomiarów. Omówiono też metody symulacyjne wykorzystujące wirtualne maszyny pomiarowe.

Abstract

The relationship between Measuring Permissible Errors of measuring machines and accuracy of the measurement is in the article presented, accepting the measure of the accuracy in the calculated form and the assessed uncertainty of measurements. Also simulation methods using virtual measuring machines were discussed.

1. Wprowadzenie

Wraz z wprowadzeniem Współrzędnościowych Techniki Pomiaru (WTP) pojawiło się wiele nowych problemów zarówno teoretycznych, jak i technicznych, związanych z oceną dokładności realizowanych pomiarów, które w klasycznej metrologii wielkości geometrycznych wydawały się już rozwiązane. Wiadomo jest, że uzyskiwane wyniki pomiarów są wtedy przydatne z punktu widzenia szeroko rozumianej kontroli jakości (z zastosowaniem konstrukcji, technologii, wytwarzania), gdy są podawane z określeniem ich dokładności, w przypadku WTP jest to zadanie szczególnie trudne i nie zawsze jednoznaczne. Dlatego użytkownicy tej techniki, jak i producenci maszyn pomiarowych często pomijają problem dokładności realizowanego pomiaru, podając w zamian dokładność urządzenia pomiarowego, określoną dla realizacji zadania pomiaru długości (wymiarowo zbliżonej do wymiarów przedmiotu mierzonego). Tak określona dokładność znacznie różni się od dokładności rzeczywistego, (aktualnie realizowanego) zadania, prowadząc do błędnych informacji. Obecnie wymaga się już powszechnie od laboratorium pomiarowego kompletnej informacji z jaką niepewnością wykonano poszczególne pomiary.

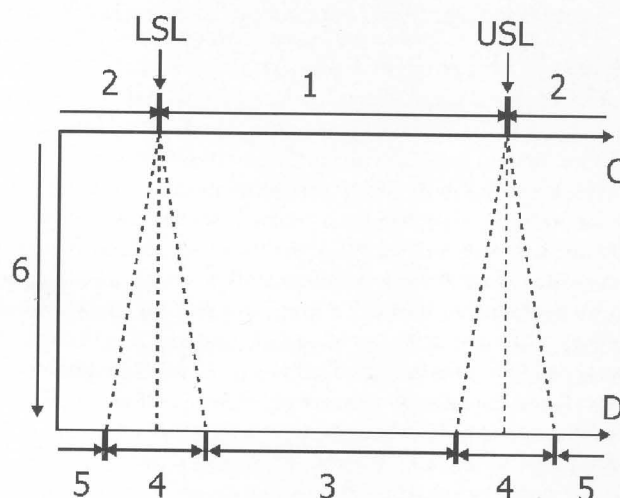
2. Teoretyczne podstawy dokładności pomiarów współrzędnościowych

Realizacja pomiaru wszelkich wielkości związana jest z konieczną jego oceną. Wynik pomiaru w postaci samej tylko pojedynczej wartości zmierzonej ma znikome znaczenie praktyczne, dopiero dodanie do niego miary dokładności w postaci niepewności pomiaru nadaje pełne znaczenie pomiarowi.

Wśród opracowań mających duże praktyczne znaczenie zarówno w obszarze kontroli jakości jak i sprawdzania przyrządów należy wymienić normę ISO 14253 - Kontrola wyrobów i sprzętu za pomocą pomiarów.

W części ISO14253-1 zawiera podstawowe reguły decyzji przy orzekaniu zgodności lub niezgodności ze specyfikacją co przedstawiono na Rys. 1.

Zgodnie z zaleceniami przewodnika dotyczącego sposobu określania niepewności pomiarów (GUM) składniki niepewności dzieli się na dwie kategorie w zależności od metody ich obliczania: *A* - niepewności, które zostały obliczone metodami statystycznymi,



Rys. 1. ISO 14253-1 Niepewność pomiaru: przedział niepewności zmniejsza pola zgodności i niezgodności: C - faza konstrukcji/specyfikacji, D - faza weryfikacji, 1 - pole specyfikacji (w zakresie specyfikacji), 2 - poza specyfikacją, 3 - pole zgodności, 4 - pole niezgodności, 5 - przedział niepewności, 6 - wzrost niepewności pomiaru *U*

B - niepewności, które zostały oszacowane innymi metodami. Wyznaczenie niepewności typu *A* ma więc charakter eksperymentalny;

W odróżnieniu od metody typu *A*, która bazuje na rozkładach częstości, metoda typu *B* obliczania składowych niepewności określa się przez analizę naukową opartą na wszystkich dostępnych informacjach o możliwej zmienności wielkości wejściowej.

Wyznaczona w oparciu o niepewność standardową, niepewność rozszerzona jest faktycznie błędem granicznym pomiaru, który w pewnych warunkach (przy założeniu np. minimalizacji wpływu strategii pomiarowej i stabilizacji warunków zewnętrznych) można utożsamić z błędem granicznym przyrządu pomiarowego i powinna się ona zawierać dla prawidłowo działającego przyrządu w obszarze błędów granicznych dopuszczalnych (ang. Maximum Permissible Errors MPE of Measurement Instrument), np. wg ISO10360). W większości przyrządów pomiarowych błędy graniczne dopuszczalne podaje się w postaci liniowej:

$$E = \pm(A + K \cdot L \leq B) \quad (1)$$

gdzie:

A, *K*, *B* - stałe,

L - mierzona długość.

Zakłada się przy tym, że błędy graniczne rzeczywiste nie przekroczą wartości błędów granicznych dopuszczalnych. W warunkach oceny dokładności WMP powinno wyznaczać się błędy graniczne dla założonej procedury oceny i porównać z ustalonymi wcześniej (wg tej samej procedury) jako błędy graniczne dopuszczalne. Takie podejście zostało również przyjęte w opracowanych dotychczas procedurach oceny dokładności WMP.

3. Dokładność maszyn pomiarowych

Ocena dokładności WMP realizowana na podstawie pomiaru długości jest próbą przeniesienia metod oceny konwencjonalnych przyrządów pomiarowych i jest konsekwencją opracowań sygnowanych przez grupę roboczą „Me” CIRP, pod kierunkiem Stöferlego oraz opracowań grupy Pfeifera, które wprowadziły pojęcia niepewności (rozumianej zgodnie z DIN) jako jedno-, dwu- i trój-współrzędnościowej, obejmującej zarówno błędy przypadkowe, jak i nieskorygowane systematyczne i ujęcie granic obszaru jej wyznaczenia w formie liniowej.

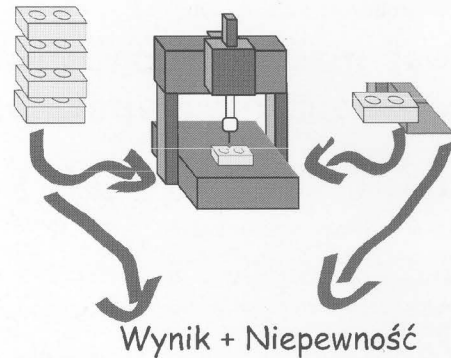
Wykorzystano tu metodę bazującą na procedurze sprawdzenia, opartej na pomiarze znanej długości.

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, CMM-A.

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. Pomiar długości jest tylko jednym z zadań realizowanych na WMP i to wcale nie reprezentatywnym dla tej techniki. Wynik sprawdzenia WMP, uzyskany poprzez pomiar długości, nie stanowi wystarczającej podstawy oceny dokładności przeprowadzonego pomiaru (poza prostymi zadaniami typu pomiar długości); nie można bowiem porównywać dokładności pomiaru, np. płytki wzorcowej i okręgu, mimo tej samej wartości długości płytki i średnicy mierzonego okręgu, z uwagi na stosowaną strategię pomiarów (liczba i rozłożenie punktów) oraz inne wartości błędów w poszczególnych punktach pomiarowych. Twierdzenie to udowadniają ponadto wyniki ostatnich prac Ratajczyka. W związku z tym opieranie się na wynikach oceny dokładności WMP, realizowanej poprzez pomiar długości, jest bardzo daleko idącym uproszczeniem, którego wpływ zaznacza się przy ustalaniu dokładności pomiaru zarysów krzywoliniowych a szczególnie powierzchni rozwijalnych, czyli dla przypadków wielopunktowej (skanującej) identyfikacji metrologicznej, charakterystycznej dla współczesnych maszyn pomiarowych. Maszyna pomiarowa powinna być traktowana jako jeden system, składający się z części mechanicznej, głowicy i oprogramowania. Wpływ tych elementów jest wyraźny w każdym zidentyfikowanym punkcie pomiarowym. Nie można obecnie nie uwzględnić roli głowicy stykowej, a przede wszystkim oprogramowania co potwierdza też opracowanie specjalnej normy ISO/CD 10360-6 dotyczącej sprawdzania algorytmów obliczeniowych. Ponadto coraz częściej podnoszonymi problemami są: wpływ strategii pomiaru oraz przedmiotu mierzonego. Opracowana przez Sładka Metoda Macierzowa (MM)[1] wychodzi naprzeciw tym problemom i pozwala na wyznaczenie dokładności WMP w określonych punktach referencyjnych.

4.1. Wyznaczenie niepewności pomiaru z wykorzystaniem obiektów wykalibrowanych

Istotą metody wykorzystującej obiekt wykalibrowany - metody porównawczej, jest przyjęcie zasady nieidentyfikowania przyczyny błędów, lecz przeprowadzenie ocen ich globalnych skutków w postaci zidentyfikowania odchyłek od wymiaru wzorcowego. Opiera się ona wykorzystaniu jako wzorców obiektów o prostej geometrii i spełnieniu wymogów podobieństwa oraz substytucji pozycji pomiarowej przedmiotu i wzorca. Na Rys. 2. przedstawiono zasadę określenia dokładności pomiaru metodą porównawczą. Przeprowadzenie pomiaru i określenie jego dokładności wymaga zastosowania odpowiedniego wzorca. W metodzie porównawczej WMP wykorzystywana jest jako komparator między niezbędnym tutaj wzorcem a przedmiotem mierzonym [1,3]; warunki komparacji podano w tabeli. [3].



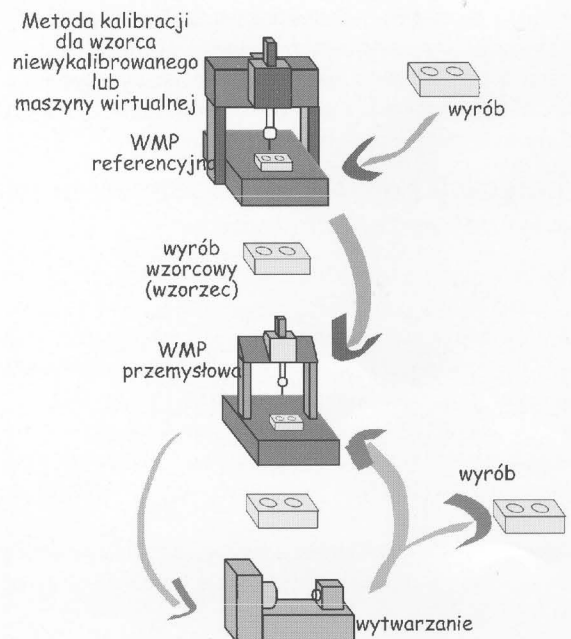
Rys. 2. Schemat metody porównawczej [4]

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

Jak łatwo zauważyć, największą zaletą tej metody jest prostota jej realizacji. Nie jest wymagana znajomość składowych błędów WMP, muszą być jednak, jak wspomniano wyżej, zachowane identyczne warunki realizacji pomiaru. Także maszyna nie musi mieć (teoretycznie) bardzo dużej dokładności, ale powinna odznaczać się dobrą powtarzalnością chwilową, którą, jak powszechnie wiadomo, łatwiej jest osiągnąć niż dużą (długoterminową) dokładność. W praktyce jednak metoda ta wymaga bardzo skomplikowanych systemów zapewniających stabilne warunki realizacji pomiarów i maszyny jednak 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, gdzie z punktu widzenia ekonomiki pomiaru staje się opłacalna.

Na Rys. 3. zaprezentowano taki właśnie sposób przemysłowego wykorzystania metody porównawczej. Na jej podstawie testowany jest

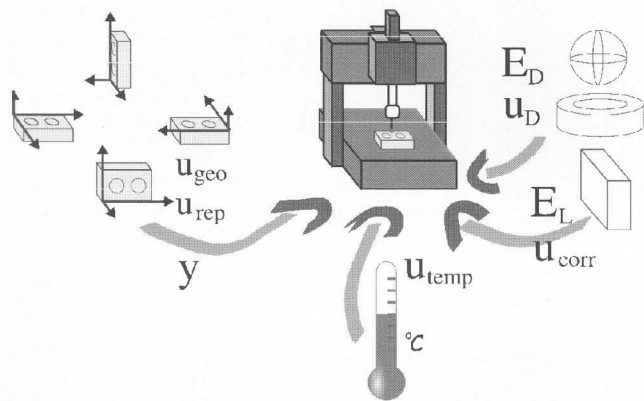


Rys. 3. Schemat wykorzystywania metody porównawczej do nadzoru jakości produkcji [4]

określony procent produkcji, co zapewnia stabilizację dokładności, a jednocześnie nie powoduje zakłócenia jej toku. Największą jednak wadą tej metody jest jej niezwykle mała uniwersalność, a należy pamiętać, że cecha ta w przypadku WMP odgrywa bardzo ważną rolę. Wysoki relatywnie jest też koszt wykonania kalibracji i okresowego sprawdzania wzorców, by mogły pokryć swym zakresem całe spektrum produkcji. Dla produkcji małoseryjnej i jednostkowej złożonych geometrycznie przedmiotów metoda ta jest praktycznie nieprzydatna.

4.2. Niepewność oceniana z wykorzystaniem niewykalibrowanych obiektów pomiarowych i wielokrotnie powtarzaną strategią pomiarową

Schemat wyznaczania niepewności pomiaru opartego o ideę wzorca niewykalibrowanego pokazano na Rys.5.



Rys. 4. Schemat wyznaczania niepewności pomiaru w oparciu o wzorec niewykalibrowany [4]

Polega on na wielokrotnym powtórzeniu pomiaru przedmiotu w czterech różnych orientacjach. Z tego pomiaru wyznaczone zostają następujące parametry niepewności:

u_{rep} niepewność uzyskanej powtarzalności pomiaru związanej z pomiarem tego samego elementu w różnych orientacjach. Wyznaczana zgodnie z zależnością:

$$u_{rep} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j^2} \quad (6)$$

gdzie n to liczba powtórzeń pomiaru, m - liczba różnych orientacji, w których element jest mierzony, s_j - odchylenie standardowe dla j -tej orientacji.

u_{geo} składowa niepewności związana z różnicami jakie uzyskamy w przypadku pomiaru obiektu dla różnych orientacji. Wyznaczana zgodnie z zależnością:

$$u_{geo} = \frac{1}{\sqrt{m}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y})^2 - \frac{u_{rep}^2}{n}} \quad (7)$$

gdzie \bar{y}_j to średnia pomiarów w j -tym położeniu, \bar{y} - średnia uzyskana ze wszystkich pomiarów.

y_{ij} to pojedynczy pomiar w i -tej serii i j -tej 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 E_L jako

$$E_L = L \cdot E_{Lp} \quad (8)$$

dla którego

$$E_{Lp} = \frac{1}{3 \cdot n_w} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{n_w} \left(\frac{L_{ij} - L_c}{L_c} \right) \quad (9)$$

n_w jest to ilość pomiaru wzorca długości wzdłuż konkretnej osi WMP L_{ij} - wskazanie maszyny dla pojedynczego pomiaru, L_c wartość wymiaru długości wzorca uzyskana podczas jego kalibracji.

Składowa niepewności związana z korekcją średniego błędu długości będzie wyznaczana jako:

$$u_{corr} = \frac{L}{L_c} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_c}{2} \right)^2 + \frac{u_w^2}{3 n_w}} \quad (10)$$

gdzie U_c jest niepewnością kalibracji wzorca, u_w - średnią odchyleń standardowych wyznaczanych z pomiarów w poszczególnych położeniach.

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 jednak mierzony jest pierścień wzorcowy oraz kula kalibracyjna. Składowa E_D jest tutaj wartością większą z ich obu. Drugą jest niepewność wyznaczenia odpowiednich parametrów u_D wyznaczana w podobny sposób jak u_{corr} .

Kolejnym parametrem może być wyznaczenie wpływu korekcji temperatury na pomiar. W takim przypadku wyznaczany będzie parametr u_{temp} zgodnie z zależnością:

Ostatecznie równanie niepewności przyjmie następującą postać:

$$u = E_D + E_L + k \cdot \sqrt{u_{rep}^2 + u_{geo}^2 + u_{corr}^2 + u_D^2 + u_{temp}^2} \quad (11)$$

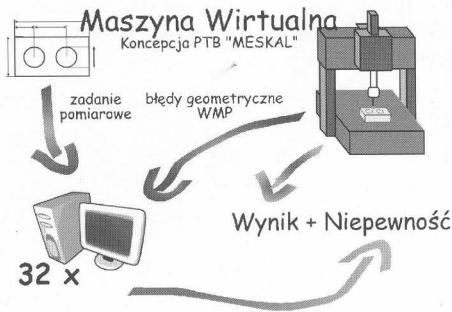
gdzie k jest współczynnikiem rozszerzającym równanie niepewności na odpowiedni stopień ufności.

5. Wyznaczanie niepewności pomiarów z wykorzystaniem symulacji przy pomocy VCMM (wirtualnej WMP)

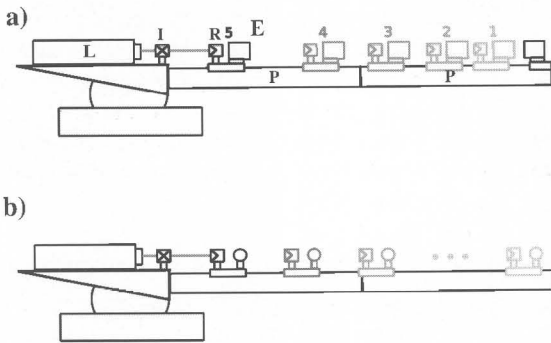
Na podstawie prac [1,2,4.] można stwierdzić, że zagadnienie oceny dokładności dowolnego pomiaru realizowanego na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (WMP) może znaleźć skuteczne rozwiązanie na podstawie symulacji pomiarów i określenia dla nich błędów z zastosowaniem kopii wirtualnej ocenianej przez WMP. Kopia wirtualna ma maksymalnie wiernie odtwarzać zachowanie metrologiczne maszyny.

Wykorzystanie wirtualnej WMP pozwala na odtworzenie wpływu nie tylko sposobu realizacji pomiaru, ale i warunków jego przeprowadzenia. Identyfikuje się tu też wpływ błędów przypadkowych poprzez wielokrotne symulacje i zdefiniowanie parametrów rozkładów poszczególnych błędów. Pierwsze prace w tym zakresie powstały na Politechnice Krakowskiej w połowie lat osiemdziesiątych i były zrealizowane w ramach programu badawczego CPBP 02.20, jednakże kwestią nie rozwiązana zadowalająco pozostawało wyznaczenie w sposób doświadczalny poszczególnych składowych błędów sumarycznego. W szczególności dotyczyło to błędów geometrycznych i wyznaczania dlań niepewności. Dopiero opracowanie w Physikalisch Technische Bundesanstalt-Braunschweig metody identyfikacji tych błędów, z użyciem płyt kontrolnych (kulowych lub otworowych) pozwoliło na efektywne zastosowanie koncepcji maszyny wirtualnej.[2]

Na Rys.5. zaprezentowano koncepcję modelu opracowanego w PTB [2,4]. System ten zainstalowano w połowie lat dziewięćdziesiątych na Politechnice Krakowskiej i na jego podstawie zbudowano modele wirtualne wielu maszyn pomiarowych. Błędy składowe identyfikowano w oparciu o pomiary z wykorzystaniem płyty kulowej i oprogramowania Kalkom [2]. W ślad za tymi badaniami także na Politechnice Krakowskiej opracowano nowy komputerowy model realizujący wirtualną WMP (w ramach projektu PB1367/T07/95/08). Koncepcja ta pozwala na uniwersalne modelowanie WMP poprzez identyfikacje dowolnymi metodami błędów składowych. Można tu stosować bez ograniczeń zarówno pomiary interferometrem laserowym, poziomnicą, jak również stosować wzorce płytowe a ostatnio liniowe wzorce kulowe czy najnowszy dedykowany do maszyn o dużych zakresach pomiarowych Laserowy Wzorec Stopniowy przedstawiony na Rys 6.[5]

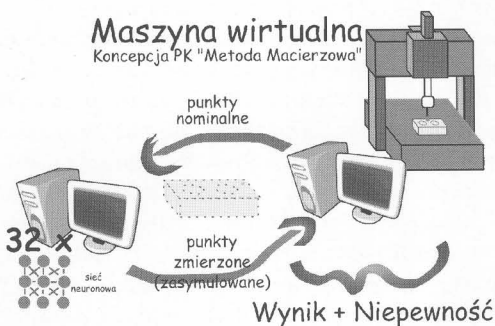


Rys. 5. Konceptcja maszyny wirtualnej opracowanej w PTB z zastosowaniem do wyznaczania on line niepewności pomiaru



Rys. 6. Wyznaczanie błędów geometrycznych przy pomocy Laserowego Wzorca Stopniowego [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. 7. Do tej pory nie są znane inne tego typu analityczne modele z wyłączeniem wspólnego opracowania PTB i dwu największych producentów WMP, mianowicie firm: Zeiss i Leitz-Brown&Sharpe, zrealizowanego w ramach programu finansowanego przez Unię Europejską i opartego zresztą na modelu PTB [2].

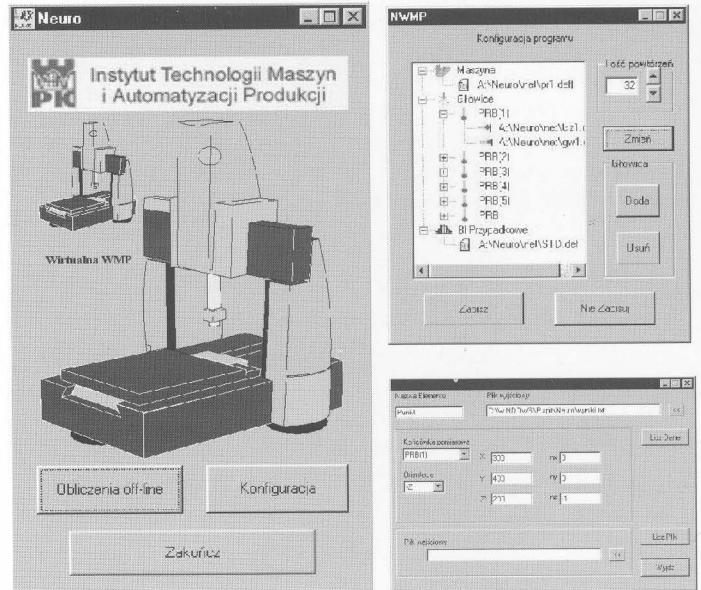


Rys. 7. Konceptcja VCMM PK opracowana w PK z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i Metody Macierzowej identyfikacji dokładności w punktach referencyjnych [1,4]

6. Podsumowanie

Można stwierdzić, że istnieje różnica pomiędzy specyfikacją dokładności maszyny pomiarowej i jej rzeczywistą zdolnością do realizacji zadania pomiarowego z wymaganą dokładnością. Czynniki pogłębiającymi tą różnicę są nie tylko warunki zewnętrzne, dokładność zadaniowa WMP, rodzaj powierzchni mierzonej ale i kwalifikacje operatora i zastosowana strategia pomiarów.

W artykule przedstawiono wybrane metody obliczenia niepewności realizowanych na CMM zadań pomiarowych. Oparte są one o wieloletnim doświadczeniu w realizacji pomiarów i szacowaniu niepewności są też zgodne z wymogami normy ISO 15530; jej po-



Rys. 8. Oprogramowanie "Neuro Virtual CMM" do wyliczania niepewności pomiaru [1,4]

szczególnych części, tych które zostały opublikowane i tych które są jeszcze przedmiotem dyskusji na form grupy roboczej WG10 ISO. Przed laboratorium pomiarowym staje więc pytanie jaka metodę wybrać? Odpowiedź na to pytanie nie może być jednoznaczna, zależy od bardzo wielu czynników i wymaga analizy nie tylko zadania pomiarowego ale i warunków laboratorium oraz wymogów produkcji i technologia zlecającego pomiary. Ponadto realizacja procedury wyznaczania niepewności wymaga specjalistycznej wiedzy i dużego doświadczenia. Nawet duże laboratoria dysponujące personelem o wieloletnim doświadczeniu muszą tutaj korzystać z pomocy specjalistów (przez co rozumieć należy zarówno wyspecjalizowane firmy doradcze jak i uczelnie). W kraju, oczekiwaniom tym wychodzi naprzeciw inicjatywa utworzenia grupy tematycznej "Pomiary i Zapewnienie Jakości w Procesach Produkcyjnych", działającej w ramach Sieci Doskonałości Procesy Produkcyjne - Promet. W warunkach międzynarodowych Europejskiego Wirtualnego Instytutu Badawczego Pomiarów Geometrycznych - EVIGEM grupującego najlepszych specjalistów z całej Europy w zakresie pomiarów geometrycznych, - z Polski, Politechnika Krakowska została zaproszona do grupy pomiarów współrzędnościowych. Innym aczkolwiek kosztowym rozwiązaniem jest instalacja oprogramowania maszyny wirtualnej VCMM pozwalającej na obliczanie on-line niepewności realizowanych pomiarów i tu też można skorzystać z doświadczeń Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej w Politechnice Krakowskiej

7. Literatura

- [1] Śladek J. Modelowanie i ocena dokładności maszyn oraz pomiarów współrzędnościowych, - Monografia Politechnika Krakowska .Kraków, 2001
- [2] Trapet E., Franke M., Härtig H., Schwenke H., Wäldele F., Cox M., Forbes A., Delbressine F., Schellekens P., Trenk M., Meyer H., Moritz G., Guth Th., Wanner E., Traceability of Coordinate Measurements According to Method of Virtual Measuring Machine. PTB F-35, Braunschweig 1999.
- [3] Trapet E., Wäldele F., Substitution method to make traceable measurements with CMMs. Working paper ISO/TC3/WG10, 1996.
- [4] Śladek J: The Relationship Between Measuring Machines Performance Specifications and their real Capability to solve given Measurement Tasks - METROMEET 2005 International Conference on Industrial Dimensional Metrology Bilbao (Spain), April 7- 8, 2005 Euskalduna Jauregia Referat Zapraszany
- [5] Krawczyk M. Metoda oceny dokładności WMP z zastosowaniem Laserowego Wzorca Stopniowego, Praca doktorska. Kraków 2005.

Title: The accuracy of machines and coordinate measurement - methods of assessing of the measuring uncertainty.