

Józef GAWLIK<sup>1</sup>, Jerzy SŁADEK<sup>2</sup>  
Andrzej RYNIWICZ<sup>2</sup>, Marcin KRAWCZYK<sup>2</sup>  
Robert KUPIEC<sup>2</sup>

## **METROLOGIA WSPÓLRZĘDNOŚCIOWA W INŻYNIERII PRODUKCJI - DOKŁADNOŚĆ POMIARU A DOKŁADNOŚĆ WYTWARZANIA**

W artykule opisano problematykę oceny dokładności pomiarów realizowanych przy zastosowaniu współrzędnościowych systemów pomiarowych. Przedstawiono metody wyznaczania niepewności pomiaru oraz problem relacji pomiędzy dokładnością urządzeń i systemów pomiarowych a dokładnością pomiaru. Opisano też metody wykorzystujące koncepcję modeli symulacyjnych - wirtualnych maszyn pomiarowych jako skutecznych narzędzi szacowania niepewności pomiarów.

### **1. WPROWADZENIE**

Inżynieria produkcji to wytwarzanie produktów najwyższej jakości i uzyskanie jednocześnie wysokiej efektywności ekonomicznej. Warunkiem jest nie tylko nowoczesna technologia wytwarzania, ale dostosowane do niej systemy metrologiczne gwarantujące zapewnienie zgodności wyrobu z jego geometryczną specyfikacją (GPS), stabilność produkcji, przygotowanie procesu wytwarzania oraz jego nadzorowanie i korektę (rys. 1). Kluczowe znaczenie, nie tylko dla zapewnienia zgodności wymiarowo kształtowej wyrobu, ale i przygotowania prototypu, ma obecnie metrologia współrzędnościowa, której podstawą są coraz dokładniejsze systemy i technologie pomiarów współrzędnościowych. Metrologia współrzędnościowa obejmuje zarówno pomiary makro, mezo, mikro i nano wymiarów. W przypadku makro wymiarów można tu wymienić stosowanie systemów laser trackerów, skanerów fotogrametrycznych czy dużych suwnicowych maszyn pomiarowych. Mikro wymiary to stosowanie maszyn współrzędnościowych zarówno stykowych, jak i bezstykowych. Nano wymiary to obecnie najtrudniejszy obszar wytwarzania, ale intensywnie rozwijany zarówno w przypadku systemów mechatronicznych jak i sprzętu medycznego i optycznego. Dla tego zakresu budowane są specjalne maszyny współrzędnościowe o rozdzielczości nanometrycznej np. ISARA 400.

<sup>1</sup> Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Politechnika Krakowska, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

<sup>2</sup> Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, Politechnika Krakowska, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków



Rys. 1. Technologie pomiarowe w inżynierii produkcji  
 Fig. 1. Measuring technologies in production engineering

Zgodnie z wymogami technologicznymi wyniki pomiarów są tylko wtedy przydatne, gdy są podawane z określeniem ich dokładności. W przypadku współrzędnościowych technik pomiaru (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 wybranego 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. Od metrologa wymaga się już powszechnie, kompletnej informacji, z jaką niepewnością wykonano poszczególne pomiary. W przypadku WTP stanowi to poważny problem, gdyż konieczna jest specjalistyczna wiedza pozwalająca na określenie niepewności każdorazowo realizowanego pomiaru, co jest szczególnie trudne w warunkach przemysłowych.

## 2. WSPÓLRZĘDNOŚCIOWE SYSTEMY POMIAROWE

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 .2. Laserowy system nadążny firmy Leica  
Fig. 2. Leica Laser Tracker

Poza laserowymi systemami śledzącymi do pomiarów makro wymiarów stosuje się systemy fotogrametryczne. Systemy te dokonują przetworzenia obrazu (np. fotograficznego) w taki sposób, by można było określić wymiar, kształt i położenie mierzonych obiektów.

Do pomiarów obiektów wielkogabarytowych stosuje się również współrzędnościowe maszyny pomiarowe (WMP) o konstrukcji mostowej (np.: LAMBDA SP firmy DEA) lub portalowej z portalem w kształcie litery L. Długość najdłuższej osi takiej WMP może dochodzić nawet do 36m.

W zakresie jednego metra sześciennego dostępny jest największy wybór współrzędnościowych systemów pomiarowych zarówno do pomiarów stykowych jak i bezstykowych. Poza klasycznymi współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi takim jak np. PMM 12106 firmy Leitz (rys. 3) obecnie coraz większą popularność zdobywają współrzędnościowe ramiona pomiarowe (WRP). Ze względu na dostępną cenę są one coraz chętniej stosowane w wielu branżach przemysłu. Na poniższym zdjęciu przedstawiono współrzędnościowe ramie pomiarowe Omega firmy Romer (rys. 4).

Rozwój przemysłu i wzrost wymagań odnośnie dokładności pomiaru przyczynił się w ostatnich latach do dużego postępu w dziedzinie mikro i nano pomiarów. W tym zakresie warto zwrócić szczególnie uwagę na współrzędnościową maszynę pomiarową ZEISS F25. Posiada ona przestrzeń pomiarową o wymiarach 100x100x100mm i umożliwia pomiary elementów 3D metodą stykową (z możliwością skanowania) i bezstykowe pomiary w 2D. Umożliwia też pomiary małych elementów w oparciu o model CAD z dużymi dokładnościami. Możliwe są nawet stykowe pomiary otworów o średnicy poniżej 1mm [8].



Rys. 3. Współrzędnościowa Maszyna Pomiarowa PMM12106  
Fig. 3. Coordinate Measuring Machine PMM12106



Rys. 4. Współrzędnościowa Ramie Pomiarowe firmy Romer  
Fig. 4. Romer Portable Measuring Arm

### 3. DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW WSPÓLRZĘDNOŚCIOWYCH

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. 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.

Zakłada się przy tym, że błędy graniczne rzeczywiste nie przekroczą wartości błędów granicznych dopuszczalnych. W warunkach oceny dokładności 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 np. współrzędnościowych maszyn pomiarowych (WMP).

W praktyce przemysłowej pomiar techniką współrzędnościową wykonuje się z reguły jednokrotnie, dlatego posługiwanie się modelem losowym, a więc wyznaczanie niepewności pomiaru metodą A jest możliwe tylko w przypadku hipotetycznego sposobu powtarzania pomiaru, co może być wykorzystane w przypadku symulacji pomiarów realnych (z zachowaniem w tej symulacji warunków powtarzalności i odtwarzalności). Ogólnie jednak należy preferować stosowanie metody typu B, co wymaga opracowania uogólnionego modelu niepewności dla danego laboratorium wyposażonego w maszynę współrzędnościową. Inaczej wygląda to zagadnienie w przypadku stosowania współrzędnościowych systemów mobilnych takich jak laserowe systemy śledzące czy ramiona pomiarowe. Konstrukcja budżetu niepewności jest tu znacznie trudniejsza z uwagi na mniejszą stabilność warunków realizacji pomiarów.

### 4. DOKŁADNOŚĆ WSPÓLRZĘDNOŚCIOWYCH MASZYN POMIAROWYCH

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, CMMMA.

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. Opracowana na Politechnice Krakowskiej Metoda Macierzowa (MM) [1] wychodzi naprzeciw temu problemowi i pozwala na wyznaczenie dokładności WMP w określonych punktach referencyjnych. Realizacja tej metody poprzez wykorzystanie laserowego systemu nadeżnego przedstawiona została na rys. 5.



Rys. 5. Realizacja metody macierzowej z wykorzystaniem Laserowego Systemu Nadążnego LSW 840 Leica  
Fig. 5. Realization of Matrix Method with the use of Lasertracker LTD840 Leica

## 5. WYZNACZANIE 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 na wykorzystaniu jako wzorców obiektów o prostej geometrii i spełnieniu wymogów podobieństwa oraz substytucji pozycji pomiarowej przedmiotu i wzorca. 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 1 [3].

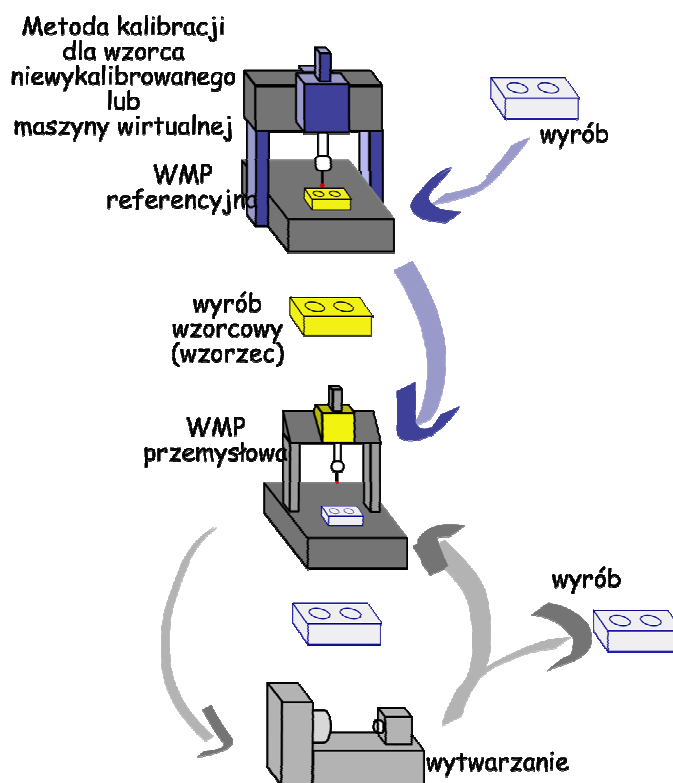
Jak łatwo zauważyć, największą zaletą tej metody jest prostota jej realizacji. Nie jest wymagana znajomość składowych błędów WMP, muszą być jednak, jak wspomniano wyżej, zachowane identyczne warunki realizacji pomiaru. Także maszyna nie musi mieć (teoretycznie) bardzo dużej dokładności, ale powinna odznaczać się dobrą powtarzalnością chwilową, którą jak powszechnie wiadomo, łatwiej jest osiągnąć niż dużą (długoterminową) dokładność. W praktyce 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.

Tabela 1. Dopuszczalne odchylenia między przedmiotem mierzonym a wzorcem używanym w metodzie porównawczej [3]

Table 1. Similarity requirements for artifacts used for the comparison method CMM errors [3]

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

Metoda ta może też być wykorzystywana w produkcji wielkoseryjnej, gdzie z punktu widzenia ekonomiki pomiaru staje się opłacalna. Zapewnić jednak należy wtedy stałą kontrolę warunków realizacji pomiarów (konieczna jest kompensacja wpływów termicznych zarówno dla WMP, jak i dla przedmiotu). Na rys. 6 zaprezentowano taki właśnie sposób przemysłowego wykorzystania metody porównawczej.



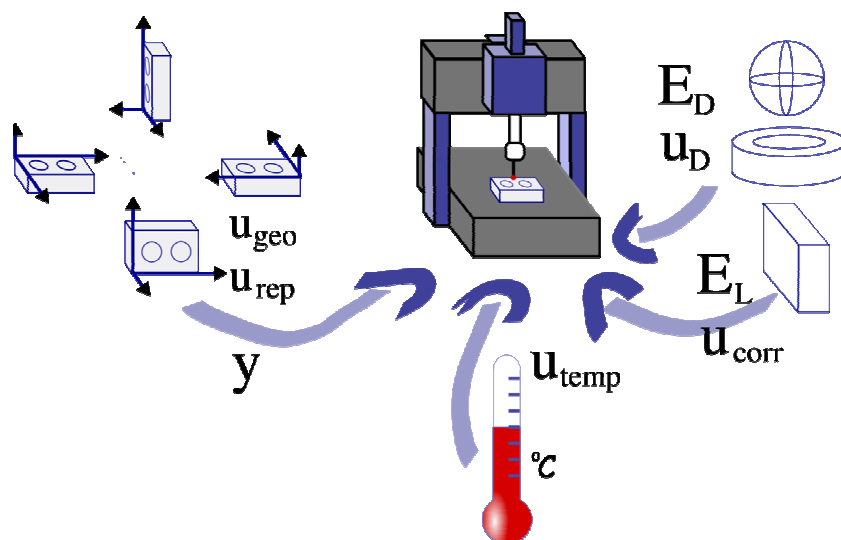
Rys. 6. Schemat wykorzystywania metody porównawczej do nadzoru jakości produkcji [4]

Fig. 6. Substitution method for management of production quality [4]

Na jej podstawie testowany jest 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.

## 6. NIEPEWNOŚĆ OCENIANA Z WYKORZYSTANIEM NIEWYKALIBROWANYCH OBIEKTÓW POMIAROWYCH I WIELOKROTNIENIE POWTARZANĄ STRATEGIĄ POMIAROWĄ

Schemat wyznaczania niepewności pomiaru opartego o ideę wzorca niewykalibrowanego pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Schemat wyznaczania niepewności pomiaru w oparciu o wzorec niewykalibrowany [4]

Fig. 7. Estimation of measurement uncertainty on the base uncalibrated artifact base [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 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 mierzonego. 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 wyliczamy składową niepewności  $U_{corr}$  związaną z korekcją średniego błędu długości. Dodatkowe składowe, jakie mogą być wyznaczone podczas określania niepewności tego rodzaju pomiaru, to składowa związana z pomiarem stykowym WMP  $E_D$ , wyznaczana w podobny sposób jak  $E_L$ . W tym przypadku jednak mierzony jest pierścień wzorcowy oraz kula kalibracyjna. Drugą składową jest niepewność wyznaczenia odpowiednich parametrów  $U_D$ , wyznaczana w podobny sposób jak  $U_{corr}$ . Kolejnym parametrem może być wpływ korekcji temperatury na wynik pomiaru.

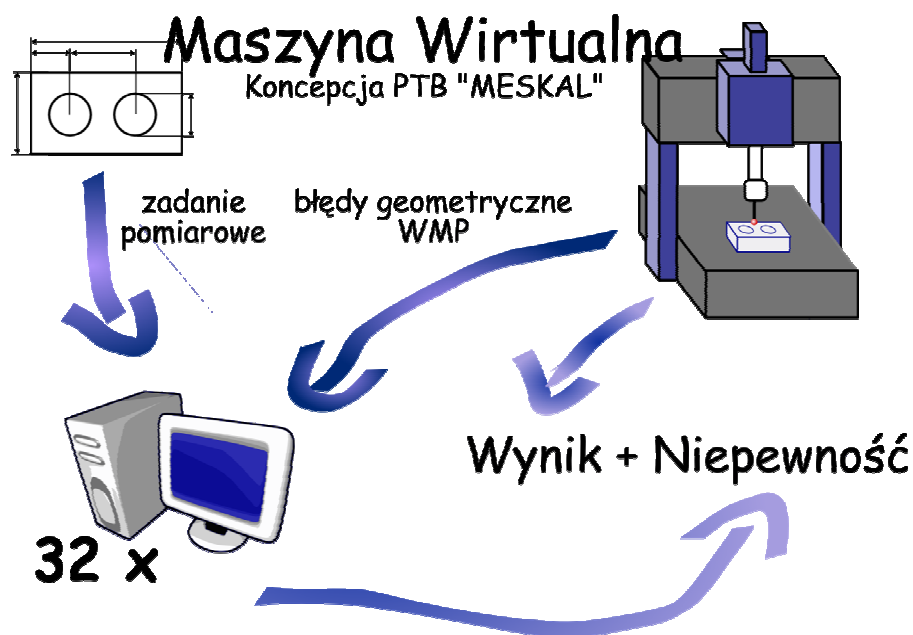
Ostatecznie równanie niepewności przyjmie następującą postać:

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

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

## 7. WYZNACZANIE NIEPEWNOŚCI POMIARÓW Z WYKORZYSTANIEM SYMULACJI ZA POMOCĄ VCMM

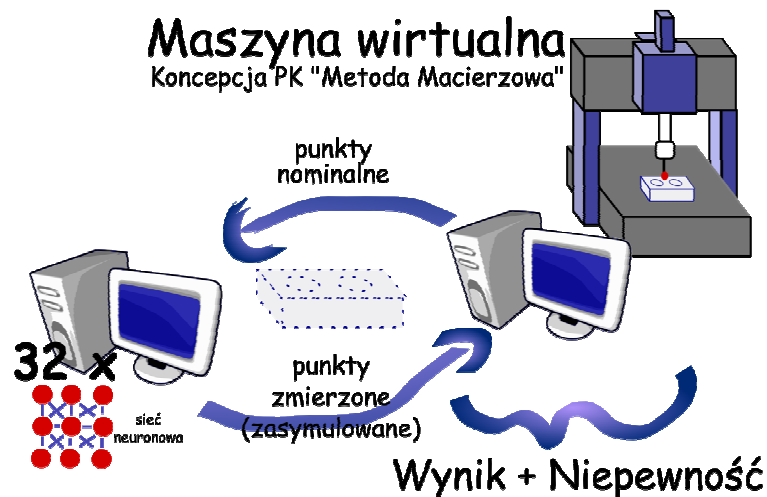
Na podstawie prac [1], [2], [4] można stwierdzić, że zagadnienie oceny dokładności dowolnego pomiaru, realizowanego na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (WMP), może znaleźć skuteczne rozwiązanie na podstawie symulacji pomiarów i określenia dla nich błędów z zastosowaniem kopii wirtualnej WMP. Kopia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



Rys. 8. Konceptja maszyny wirtualnej opracowanej w PTB do wyznaczania on line niepewności pomiaru  
Fig. 8. Virtual CMM made by PTB for on-line estimation of uncertainty

Na rys.8. zaprezentowano koncepcje 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). 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 Metody Macierzowej i różnych orientacji i pozycji płyty kulowej - jako podstawy do budowy siatki punktów referencyjnych. 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.



Rys. 9. Koncepcja VCMM PK opracowana w PK z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i Metody Macierzowej identyfikacji dokładności w punktach referencyjnych [1], [4]

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

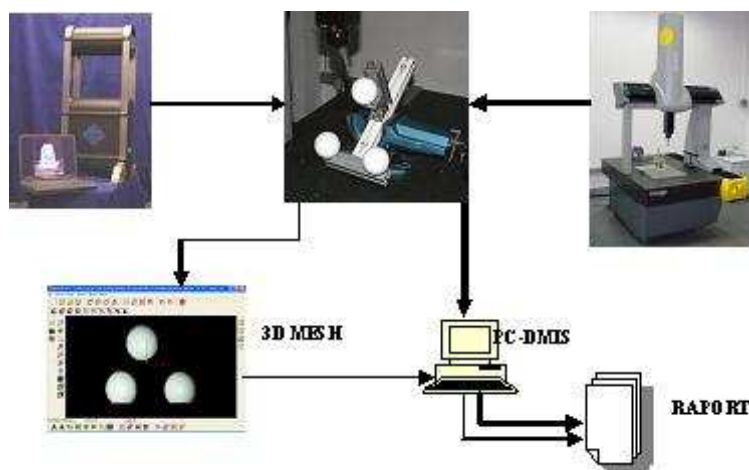
## 8. WYZNACZANIE NIEPEWNOŚCI POMIARÓW W OPTYCZNYCH SYSTEMACH WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWYCH

Problem niepewności pomiarów realizowanych z wykorzystaniem skanerów optycznych wykorzystujących światło strukturalne jest zadaniem, jakie pojawiło się w obszarze pomiarów współrzędnościowych stosunkowo niedawno. Zadanie to może być realizowane tylko w przypadku przeprowadzania wzorcowania takich systemów, których charakterystyka metrologiczna uzyskana została w wyniku wzorcowań na dokładnej WMP [7]. Wykorzystuje się do tego celu wzorce przestrzenne np. płyty z elementami przestrzennymi.

W ramach projektu badawczego finansowanego ze środków na naukę w latach 2005-2007, realizowanego przez Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Krakowskiej, opracowano system oparty na tej koncepcji pomiarów hybrydowych OMMM (Opto-Mechanical Measurement Machine). Podstawową jego zaletą jest możliwość uzyskania znacznie większej liczby punktów pomiarowych (rzędu setek tysięcy, milionów) i relatywnie krótki czas pomiaru w stosunku do klasycznych pomiarów współrzędnościowych. Pozwala to, na pomiar wytwarzanych części maszyn nawet ze 100% modelem kontroli. Naturalnym odbiorcą tej metody są zakłady przemysłu motoryzacyjnego, AGD czy elektroniki użytkowej, charakteryzujące się produkcją seryjną.

Zasada działania OMMM jest następująca: dla mierzonego obiektu wyznaczany jest układ współrzędnych metoda stykową i na nim bazuje pomiar realizowany w następnej sekwencji, gdzie obiekt jest wstępnie mierzony za pomocą optycznego systemu pomiarowego. Wynikiem pomiaru jest chmura punktów, czyli współrzędna  $x,y,z$  każdego pomierzonego punktu obiektu. Identyfikowane są też te elementy, które nie zostały odwzorowane w sposób zadowalający lub jest to inny typ wymiaru np. wewnętrzny i istnieje konieczność realizacji pomiaru stykowego za pomocą maszyny współrzędnościowej. Dlatego tak istotne jest by obydwa urządzenia dokonywały pomiaru z wykorzystaniem tego samego układu odniesienia, bazującego na elementach mierzonego obiektu lub trwale z nim związanym.

Koncepcja systemu OMMM zaprezentowana jest na rys.10.



Rys. 10. Koncepcja systemu OMMM

Fig. 10. Concept of OMMM system

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. Koncepcja wyznaczania niepewności pomiaru oparta jest o metodę wielopozycyjną opisaną w punkcie 6.

## 9. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wybrane metody obliczania dokładności pomiarów realizowanych metodami współrzędnościowymi. Stosowanie tych metod oparte jest na wieloletnim doświadczeniu w realizacji pomiarów i szacowaniu niepewności. Metody te zgodne są też z wymogami normy ISO 15530; jej poszczególnych części, tych które zostały opublikowane i tych które są jeszcze przedmiotem dyskusji na form grupy roboczej WG10 ISO. Zaprezentowano procedury oparte o wykorzystanie metody wielopozycyjnej z wykorzystaniem obiektów niekalibrowanych, metody stosującej obiekty kalibrowane z metodą porównawczą oraz realizujące symulację pomiarów z zastosowaniem maszyny wirtualnej (VCMM). Przed laboratorium pomiarowym staje więc pytanie jaką 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 oczekiwań technologa zlecającego pomiary. Ponadto realizacja procedury wyznaczania niepewności wymaga specjalistycznej wiedzy i dużego doświadczenia. Innym, aczkolwiek kosztowym rozwiązaniem jest instalacja oprogramowania maszyny wirtualnej VCMM, pozwalającej na obliczanie on-line niepewności realizowanych pomiarów. Systemami takimi dysponują jednak nieliczne laboratoria na świecie, w tym Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej.

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

## LITERATURA

- [1] SŁADEK J., 2001, *Modelowanie i ocena dokładności maszyn oraz pomiarów współrzędnościowych*, Monografia, Politechnika Krakowska, Kraków.
- [2] TRAPET E., 1999, *Traceability of Coordinate Measurements According to Method of Virtual Measuring Machine*, PTB F-35, Braunschweig.
- [3] TRAPET E., WÄLDELE F., 1996, *Substitution method to make traceable measurements with CMMs*, Working paper, ISO/TC3/WG10.
- [4] SŁADEK J., 2005, *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, Euskalduna Jauregia.
- [5] KRAWCZYK M., 2005, *Metoda oceny dokładności WMP z zastosowaniem Laserowego Wzorca Stopniowego*, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków.
- [6] SŁADEK J., KRAWCZYK M., i inni, 2007, *The assessment of the coordinate measurement accuracy based on Matrix Method with use of artificial neural networks*, 10th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing Specification and Verification for Assemblies, March 21st - 23rd, in Erlangen, Germany.
- [7] SŁADEK J., SITNIK R., KUPIEC M., BŁASZCZYK P., *The Contact-Optical Coordinate Measuring System*, (*Measurement in publ.*).
- [8] MIGACZ M., 2006, *Współrzędnościowa maszyna pomiarowa F25 do pomiarów systemów mikrotechnologii*, Mechanik, 3.

---

COORDINATE METROLOGY IN PRODUCTION ENGINEERING – MEASUREMENT ACCURACY AND  
PRECISION MANUFACTURING

This article presents the problems of estimating the accuracy of measurements made by using coordinate measuring machines. The methods of estimating the uncertainty of measurements and issues concerning the relation between the accuracy of instruments and measuring systems and the accuracy of measurement are described. Methods based on the concept of simulation models (Virtual Measuring Machines) as effective tools for estimation of measurement uncertainty are also described.