

Prof. dr Maciej Szafarczyk  
Mgr inż. Jarosław Chrzanowski  
Rafał Wypysiński  
Instytut Technologii Maszyn  
Politechniki Warszawskiej

## NOWA KONCEPCJA SPRAWDZANIA DOKŁADNOŚCI MASZYN NC

*W maszynach sterowanych numerycznie (obrabiarkach, robotach...) są realizowane zaprogramowane ruchy opisane w założonym układzie współrzędnych. W każdym przypadku jest istotne sprawdzenie dokładności realizacji tych zaprogramowanych ruchów. Istnieje do tego celu wiele systemów i urządzeń, nie spełniają one jednak większości stawianych im wymagań. Pręt wektorowy jest nowym, zgłoszonym do opatentowania, urządzeniem pozwalającym na sprawdzanie zarówno dokładności pozycjonowania jak dokładności torów ruchów maszyn sterowanych numerycznie.*

## NEW CONCEPTION FOR TESTING ACCURACY OF NC MACHINES

*Numerically controlled machines realize programmed movements described in a chosen system of co-ordinates. It is always important to test the accuracy of realization of these programmed movements. There are several testing systems and testing equipment for this purpose, but they do not fulfill most requirements. Vector bar is a new device proposed for testing of both positioning accuracy and accuracy of NC movements.*

### 1. WPROWADZENIE

Sterowanie numeryczne zastosowane do obrabiarek około pięćdziesiąt lat temu stało się powszechnym sposobem sterowania ruchami maszyn technologicznych i nie tylko. Jedną z istotnych zalet tego rodzaju sterowania jest możliwość programowego opisu żądanych ruchów i położeń z dowolnie dużą dokładnością, przy czym opisujący je program nie ulega zużyciu i jest łatwy do: przechowywania, przekazywania, powielania i modyfikacji.

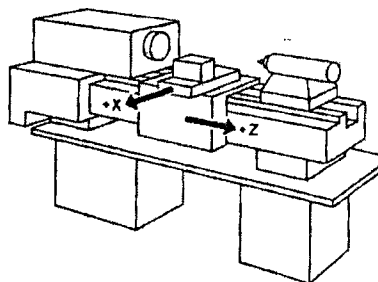
Precyzja realizacji ruchów opisanych w programie zależy od dokładności ruchów sterowanych numerycznie, dokładności geometrii usytuowania tych ruchów w maszynie oraz wpływu realizowanego w tym czasie procesu technologicznego. W przypadku

obrabiarki NC wpływ na dokładność ruchów mają, na przykład, siły skrawania oddziałujące na jej zespoły. Dlatego przy sprawdzaniu dokładności obrabiarek NC wyróżnia się próby pracą, gdy wynikiem testu jest dokładność obróbnego przedmiotu, oraz testy przy biegu luzem, gdy decydują dokładności ruchów bez obróbki.

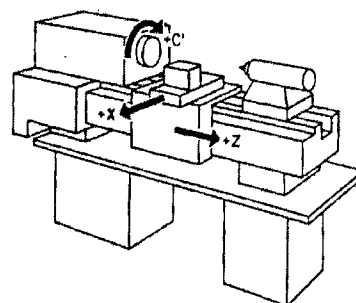
Ponieważ celem stosowania obrabiarek jest uzyskiwanie przedmiotów o żądanych kształtach i wymiarach próba pracą jest korzystniejsza, gdyż ma charakter kompleksowy. Jednak jest to tylko sprawdzenie obróbki określonego przedmiotu przy określonych warunkach skrawania. Takie testowanie spełnia wszelkie wymagania w przypadku obrabiarek zadaniowych do produkcji masowej. W przypadku obrabiarek uniwersalnych, a więc większości obrabiarek NC, bardziej wszechstronne mogą być testy przy biegu luzem.

## 2. TYPOWE UKŁADY RUCHÓW NC W OBRABIARKACH

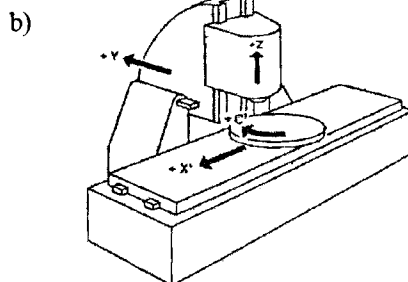
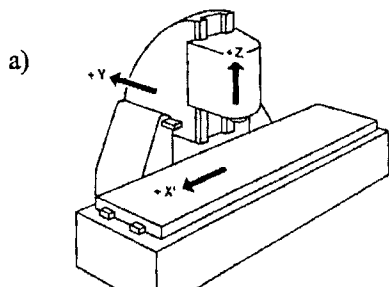
Rozpatrując możliwe kombinacje ruchów narzędzia względem przedmiotu obrabianego należało by rozpatrzeć przypadki zawierające od jednego do trzech ruchów obrotowych i przemieszczeń liniowych. W praktyce spotyka się pięć kombinacji ruchów sterowanych numerycznie [3]. Oznaczając literą A współrzędną kątową a literą L współrzędną liniową będą to:



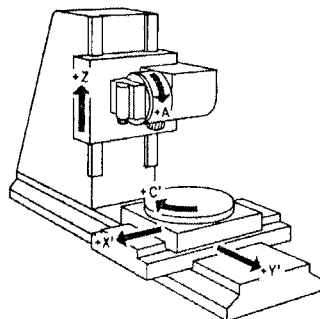
Rys.1. Typowa tokarka – 2L



Rys.2. Tokarka z położeniem kątowym wrzeciona sterowanym numerycznie – 1A2L



Rys.3. Centra do obróbki korpusów: a) trzyosiowe – 3L, b) czteroosiowe – 1A3L



Rys.4. Pięciosiowe centrum do obróbki korpusów - 2A3L

### 3. POMIARY DOKŁADNOŚCI OBRABIAREK NC

Do sprawdzenia dokładności obrabiarki NC przy biegu luzem potrzebne są zarówno pomiary statyczne (dokładności uzyskiwanych położeń) jak i pomiary dynamiczne (dokładności torów ruchów, właściwa prędkość ruchów...), Istotne są cechy geometryczne z których mogą wynikać błędy statyczne bądź dynamiczne: na przykład prostoliniowość ruchów elementarnych, dokładność pomiaru współrzędnych, prostopadłość osi.

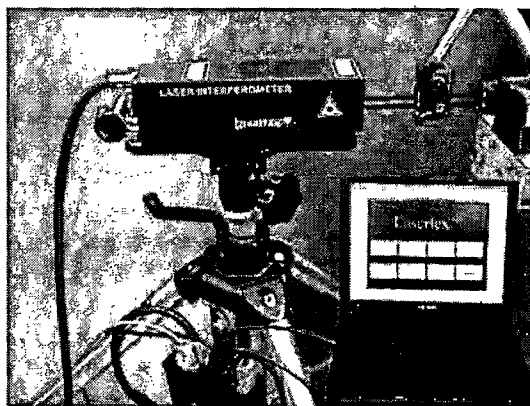
Przed rozpoczęciem badania należy dokładnie określić jego cel, gdyż dokładność stanowi pojęcie ogólne, informujące jedynie o stopniu zgodności wyniku pomiaru z wartością rzeczywistą wielkości mierzonej [1]. Na dokładność maszyn NC wpływa wiele czynników. Do najważniejszych należą: prawidłowość geometryczna realizacji ruchów elementarnych (prostoliniowość, bicie przy obrocie itp.), dokładności pomiarów przemieszczeń liniowych i kątowych, dokładność i powtarzalność pozycjonowania osi sterowanych numerycznie, ustawienie osi względem siebie oraz dokładność realizowania kształtów torów i prędkości ruchów w stosunku do wartości zadanych. Równie ważny jest wybór samej metody pomiaru, która jest obciążona mniejszym lub większym błędem. Zastosowanie nieodpowiedniej metody może prowadzić do wystąpienia błędu pomiaru, zwanego błędem metody (np. przyjęcie upraszczającego założenia idealizującego budowę narzędzia pomiarowego lub nieuwzględnienie w przyjętej metodzie pewnych wielkości wpływających na ostateczny wynik pomiaru) [9]. Ważną miarą jakości wyniku pomiaru jest niepewność, informująca o wiarygodności przeprowadzonych badań. Wpływa na nią szereg czynników, nie związanych z samą obrabiarką NC, której dokładność chcemy określić. Należą do nich m.in.: niepełna definicja wielkości mierzonej, subiektywne błędy w odczytaniu wskazań przyrządów analogowych, czy też skończona rozdzielczość albo próg pobudliwości przyrządu. Przy końcowej ocenie wyników badań należy uwzględnić błąd pomiaru – dopiero wtedy możemy je wykorzystać do porównań i analiz.

Ważna jest poprawne zaplanowanie procedury pomiarowej: np. przed rozpoczęciem badań dokładności i powtarzalności należy najpierw wykonać czynności poziomowania i osiowania. Pomiary powinny być prowadzone w warunkach jak najbardziej zbliżonych do normalnej eksploatacji – wymagane jest wcześniejsze odpowiednie nagrzanie

maszyny. Maszyna przed badaniem powinna być kompletnie zmontowana i w pełni sprawna. Równie ważne jak przeprowadzenie pomiarów, jest umiejętność poprawnej oceny wyników oraz odpowiednie ich przedstawienie (w formie graficznej, tabelarycznej itp.) [2].

#### 4. OBECNIE STOSOWANE METODY

Laser – pozwala określić prostoliniowość, prostopadłość, wartości przemieszczeń i prędkości w danej osi - przez interferencję dwóch fal: odbitej od przemieszczającego się obiektu i nieruchomego zwierciadła odniesienia [5].

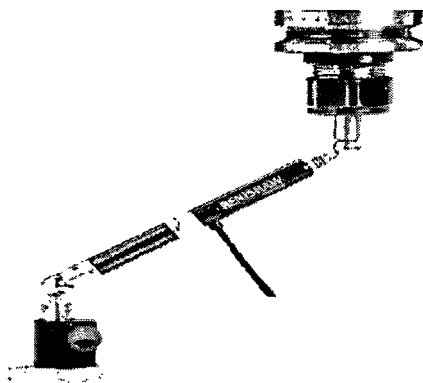


Rys.5. Interferometr laserowy

Do zalet tej metody należą: duża dokładność, wszechstronność zastosowań, prostota wykonania pomiarów, możliwość stosowania w warunkach przemysłowych, szybkie i bezpieczne mocowanie oraz możliwość prowadzenia pomiarów w dużym zakresie. Podstawową wadą większości tego typu metod jest konieczność powtórzenia pomiarów w przypadku przerwania wiązki światła laserowego oraz zależność pomiarów od temperatury, wilgotności i ciśnienia powietrza.

DBB (Double BallBar) – pomiar opiera się na analizie kształtu wykresu kołowego, wykonanego w płaszczyznach równoległych do XY, XZ lub YZ .

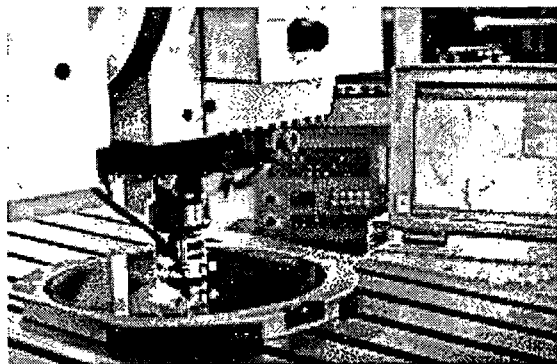
Zalety: możliwość zastosowania w warunkach warsztatowych, gdyż nie ma elementów optycznych, które łatwo uszkodzić, obudowa odporna na zanieczyszczenia i chłodziwo, krótki czas testu (ok. 10 min), możliwość wykrycia 26-ciu różnych błędów przy pomocy oprogramowania (geometria i dynamika maszyny), elastyczność i łatwość dostosowania do warunków pomiaru.



Rys.6. Pręt teleskopowy DBB

**Wady:** dla dużych maszyn – pomiary tylko lokalne, pomiar tylko w płaszczyznach równoległych do płaszczyzn wyznaczanych przez osie układu współrzędnych obrabiarki, ścieżka pomiarowa musi mieć kształt koła, brak precyzyjnego pomiaru położenia kąтового pręta w ruchu po okręgu (kąt jest tylko szacowany na podstawie pomiaru czasu i znajomości zaprogramowanej prędkości ruchu w czasie testu).

**Siatka optyczna (Crossgrid)** - podczas testu można wykonywać dowolne ruchy w płaszczyznach XY, XZ lub YZ.

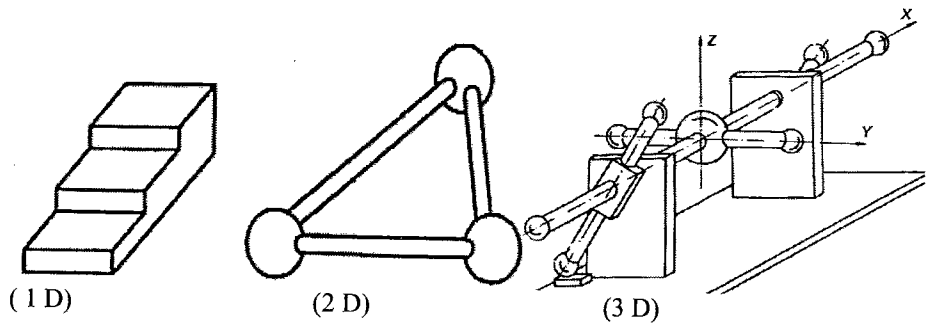


Rys.7. Pomiar siatką optyczną

**Zalety:** możliwość wykonywania dowolnych ruchów na płaszczyźnie pomiarowej w czasie testu .

**Wady:** dłuższy czas potrzebny na zainstalowanie i kalibrację, podatna na uszkodzenia siatka optyczna (lustro), stosunkowo wysoka cena.

**Wzorce materiałne** – umożliwiają sprawdzanie położzeń w wybranych punktach [4]. Zależnie od rozmieszczenia tych punktów dzielą się na wzorce jednowymiarowe, dwuwymiarowe i trójwymiarowe:



Rys.8. Wzorce do sprawdzania dokładności pozycjonowania

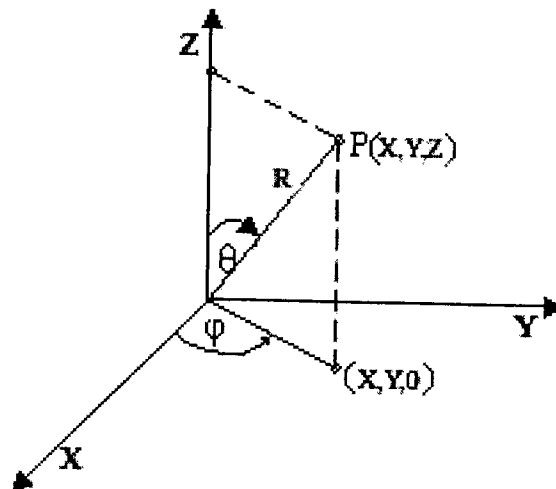
Zalety : niska cena wzorców, prosta budowa i krótki czas prowadzenia testu.

Wady: ograniczone zastosowanie oraz wykrywanie nieprawidłowości bez bliższego określenia ich przyczyn.

Do badań laboratoryjnych oraz w prospektach producentów można spotkać jeszcze wiele innych urządzeń do testowania dokładności maszyn sterowanych numerycznie, które dotychczas nie znalazły zastosowania w praktyce przemysłowej.

## 5. KONCEPCJA PRĘTA WEKTOROWEGO

Koncepcja pręta wektorowego opiera się na pomiarze położenia punktu we współrzędnych sferycznych, do czego niezbędne jest określenie długości promienia ( $r$ ) i dwóch kątów obrotu ( $\theta$  i  $\varphi$ ) :



Rys.9. Porównanie współrzędnych

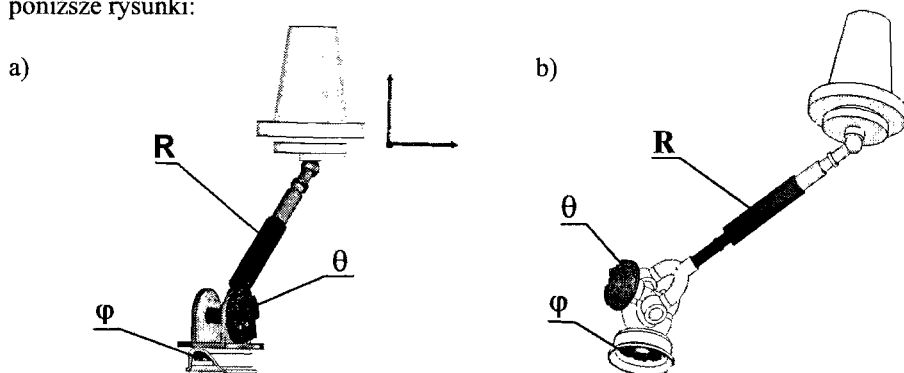
Pomiar długości przemieszczenia ( $R$ ) jest realizowany przez dokładny czujnik przemieszczeń liniowych o możliwie dużym zakresie pomiarowym, zaś pomiarów kątów obrotu dokonują przetworniki kątowe, wyposażone we własne łożyskowania oraz sprzęgła. Dane są zbierane w komputerze przez kartę przetwornika A/C i przeliczane w zależności od potrzeb np. na współrzędne kartezjańskie. Porównanie aktualnego położenia zajmowanego przez zespół roboczy maszyny (zadanego w programie obróbkowym) ze współrzędnymi określonym za pomocą pręta wektorowego określa dokładność obrabiarki NC. Dokładność określania położenia przy pomocy pręta wektorowego jest większa od dokładności maszyny sterowanej numerycznie.

**Zalety:** wszechstronność i uniwersalność zastosowania, trójwymiarowa przestrzeń pomiarowa, możliwość wykonania pomiarów dynamicznych, ścieżka pomiarowa może odwzorowywać kształt przedmiotu – można określić dokładność wykonania przedmiotu jeszcze przed jego rzeczywistym wykonaniem i ewentualnie wprowadzić korekty do programu, praktycznie dowolny kształt ścieżki pomiarowej (znajdującej się w przestrzeni pomiarowej pręta wektorowego), możliwość wnioskowania o stanie ogólnym wszystkich zespołów obrabiarki, precyzyjne określanie przyczyn niedokładności (dzięki specjalnemu oprogramowaniu), odporność na zakłócenia i uszkodzenia, prosta kalibracja;

**Wady:** ograniczenie przestrzeni pomiarowej do czaszy kulistej, stosunkowo wysoki koszt urządzenia i złożona budowa, stosunkowo duża masa (wynikająca z zastosowania precyzyjnych przetworników pomiaru kąta), czasochłonna budowa eksperckiego systemu wnioskowania o stanie obrabiarki.

## 6. PRZYKŁADOWE ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE

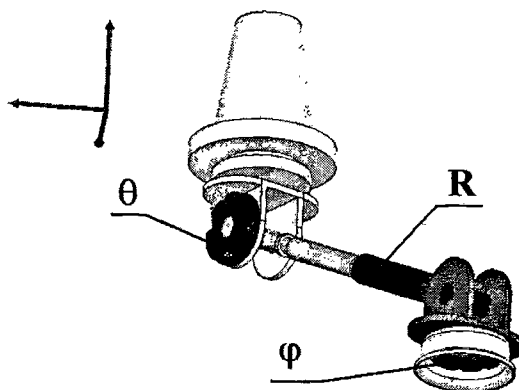
Ze względu na złożoność zagadnienia pomiarów dynamicznych w przestrzeni 3D, istnieje wiele możliwych konfiguracji kinematycznych pręta wektorowego. Wybór determinuje uzyskanie jak największej dokładności i możliwie dużego zakresu pomiarowego przy zwartej konstrukcji, prostocie wykonania i minimalizacji kosztów (zarówno wykonania jak i użytkowania). Przykładowe rozwiązania przedstawiają poniższe rysunki:



Rys. 10. Przykładowe konstrukcje pręta wektorowego: a) z czujnikami kąta obrotu przy podstawie, b) z wykorzystaniem przegubu Kardana

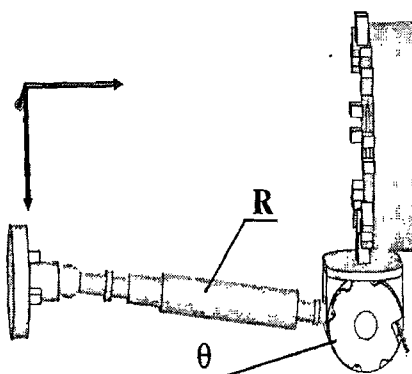
Na rysunkach zostały oznaczone elementy pomiarowe (dwa do pomiaru kąta obrotu:  $\theta$  i  $\varphi$  oraz jeden do pomiaru przemieszczeń liniowych:  $R$ ), schematycznie narysowane elementy wykonujące ruch podczas pracy urządzenia oraz elementy mocujące do obrabiarki. Zastosowanie przegubu kulistego (zakończenie wysuwanego ramienia), mocowanego do uchwytu za pomocą magnesu, pozwala uniknąć zniszczenia urządzenia pomiarowego w razie nieprzewidzianej kolizji. Ma to jednak swoją wadę – gdy ramię znajduje się w pozycji pionowej, możliwy jest obrót przegubu z niejednoznacznym pomiarem odpowiadającego mu kąta obrotu mierzonego przez czujnik zamocowany w podstawie. Aby tego uniknąć, należy wprowadzić tzw. „martwą strefę”, zabronioną dla ruchu czujnika podczas badań. Będzie ona miała kształt stożka zwróconego podstawą w stronę przegubu kulistego. Kąt stożka uzależniony jest od kąta tarcia i przyjętej konfiguracji kinematycznej układu.

Kolejne rozwiązanie pozwala na ograniczenie „martwej strefy”, jednak stwarza ryzyko uszkodzenia przyrządu:



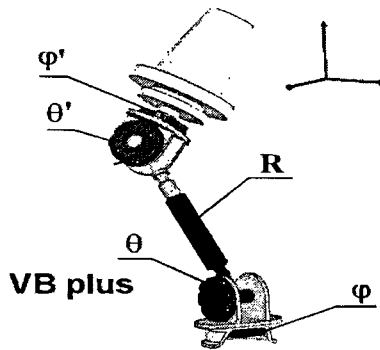
Rys.11. Pręt z rozdzieleniem czujników pomiaru kąta

Możliwe są także inne konfiguracje i wykorzystanie pręta wektorowego:



Rys.12. Pręt wektorowy do badania tokarki





Rys.13. Pręt wektorowy do pomiaru pięciu współrzędnych

Rozbudowana wersja pręta wektorowego (tzw. VBplus), umożliwiająca badanie dokładności przestrzennej obrabiarek o 5 osiach sterowanych numerycznie, wyposażona jest w cztery czujniki do pomiaru kąta obrotu i jeden czujnik do pomiaru promienia.

## 7. WNIOSKI

Sprawdzanie dokładności obrabiarek NC stanowi złożone zadanie konstrukcyjne i metrologiczne. Perspektywa rozwoju metod badawczych niesie ze sobą możliwości zwiększenia dokładności obróbki, szybszego sprawdzania i diagnozowania stanu maszyn. Dzięki nowym metodom i przyrządom pomiarowym działania te przebiegają coraz szybciej i dostarczają coraz więcej informacji, eliminując wady i ograniczenia starszych rozwiązań. Można sądzić, że koncepcja zastosowania pręta wektorowego odegra znaczącą rolę w tym zakresie.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] „Metrologia wielkości geometrycznych” W. Jakubiec, J. Malinowski; Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1996
- [2] „Polska Norma. Przepisy badania obrabiarek” PN-ISO 230-2
- [3] „Polska Norma. Maszyny sterowane numerycznie” PN-93/M-55251
- [4] „Współrzędnościowa technika pomiarowa. Maszyny i roboty pomiarowe” Eugeniusz Ratajczyk, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1994
- [5] Prospekt firmy Renishaw „Szybka ocena diagnostyczna stanu technicznego obrabiarek”
- [6] Prospekt firmy Heidenhain „Angle Encoders”, luty 2004
- [7] „Deterministic metrology of paralel kinematic machines” V.T. Nortman CIRP 49/1/2000, str. 281
- [8] „A generalized geometric error model for multiaxis machines” C.R. Zhang, M. Query CIRP 36/1/1987 str. 253