

**Politechnika Poznańska**  
**Instytut Technologii Mechanicznej**

**Laboratorium**  
**Badania Maszyn CNC**

**Nr 1**

**Pomiary dokładności pozycjonowania**  
**laserowym systemem pomiarowym ML-10**

Opracował:  
Dr inż. Wojciech Ptaszyński

Poznań, Kwiecień 2005

## 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami pomiaru dokładności pozycjonowania osi liniowych obrabiarek sterowanych numerycznie, parametrami opisującymi dokładność pozycjonowania, rzeczywistymi dokładnościami obrabiarek, metodami kompensacji błędów pozycjonowania oraz urządzeniami służącymi do pomiaru dokładności pozycjonowania.

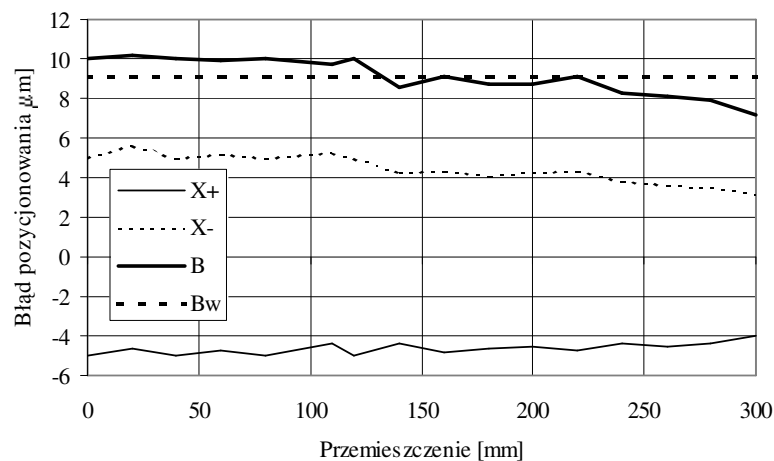
## 2. Metody pomiaru

Metody pomiaru dokładności pozycjonowania osi liniowych zawarte są w normie PN-ISO 230/2. Wyciąg z normy z najważniejszymi informacjami o normie zawarte są w instrukcji nr 2 do ćwiczenia „Badanie dokładności pozycjonowania osi obrotowych sterowanych numerycznie”.

## 3. Kompensacja błędów osi w układach sterowań

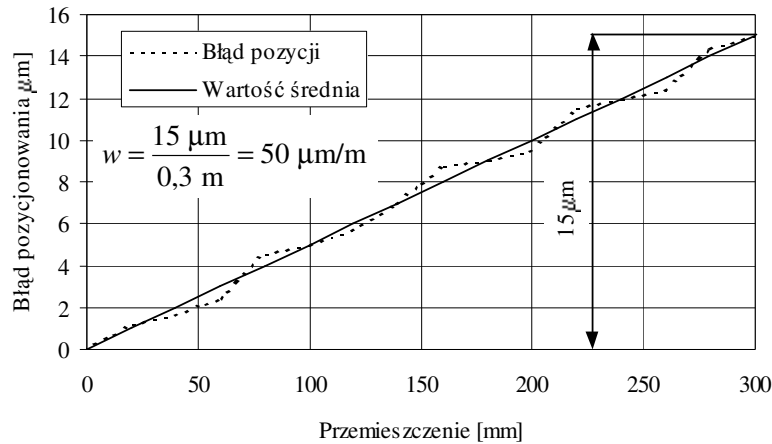
Współczesne układy sterowań numerycznych umożliwiają kompensowanie błędów pozycjonowania osi sterowanych numerycznie. Rozróżnia się następujące rodzaje kompensacji błędów pozycjonowania:

- kompensacja histerezy (luz nawrotny) – przy różnych kierunkach ruchu przy tej samej pozycji zadanej oś zajmuje różne pozycje. Kompensacja błędu histerezy polega na wprowadzeniu wartości kompensacyjnej wyznaczonej jako wartość średnia histerezy  $\bar{B}$  z całego zakresu ruchu (rys. 1).



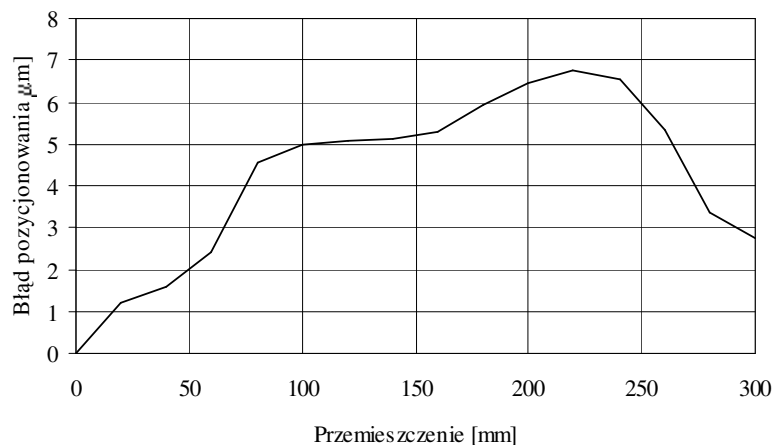
Rys. 1. Wyznaczenie współczynnika kompensacji błędu histerezy ( $B_w = \bar{B}$ )

- kompensacja błędu liniowego – wykres błędu w przybliżeniu ma charakter liniowy (rys. 2). Kompensacja błędu sprowadza się do wprowadzenia współczynnika określającego błąd na określonej drodze np. 50  $\mu\text{m}/\text{m}$  (rys. 2). W czasie kompensacji błędu liniowego zwykle możliwe jest również wprowadzenie kompensacji histerezy.



Rys. 2. Wyznaczenie współczynnika kompensacji błędu liniowego

- kompensacja średnia błędu nieliniowego – wykres błędu średniego z ruchu w kierunku dodatnim i ujemnym ma charakter nieliniowy (rys. 3). Kompensacja błędu polega na wyznaczeniu wartości błędów średnich w określonych punktach i wprowadzeniu ich do tabeli kompensacyjnej w układzie sterowania (tabela 1). W czasie kompensacji błędu liniowego średniego zwykle możliwe jest również wprowadzenie kompensacji histerezy.

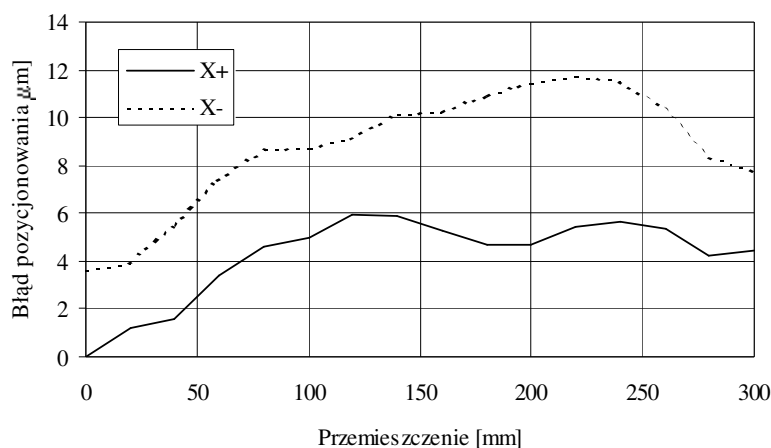


Rys. 3. Wyznaczenie wartości kompensacji błędu nieliniowego średniego

**Tabela 1.** Wyznaczone wartości kompensacji błędu nieliniowego średniego

Przeszczenie [mm]	Wartości kompensacji [μm]
0	0
20	1
40	2
60	2
80	5
100	5
120	5
140	5
160	5
180	6
200	6
220	7
240	6

- kompensacja dwukierunkowa błędu nieliniowego – wykresy błędów w kierunku dodatnim i ujemnym mogą być różne i mają charakter nieliniowy (rys. 4). Kompensacja błędu polega na wyznaczeniu wartości błędów dla każdego kierunku w określonych punktach kompensacyjnych i wprowadzeniu ich do tabeli kompensacyjnej w układzie sterującym (tabela 2). W czasie kompensacji błędu nieliniowego dwukierunkowego nie stosuje się kompensacji błędu histerezy ponieważ błąd ten jest kompensowany przez różne charakterystyki dla poszczególnych kierunków ruchów.



Rys. 4. Wyznaczenie wartości kompensacji błędu nieliniowego dwukierunkowego

**Tabela 2.** Wyznaczone wartości kompensacji błędu nieliniowego średniego

Przemieszczenie [mm]	Wartość kompensacji X+ [μm]	Wartość kompensacji X- [μm]
0	0	4
20	1	4
40	2	5
60	3	7
80	5	9
100	5	9
120	6	9
140	6	10
160	5	10
180	5	11
200	5	11
220	5	12
240	6	12
260	5	10
280	4	8
300	4	8

Po wprowadzeniu kompensacji do układu sterowania układ sterujący oblicza skorygowane położenia zadane dodając lub odejmując wartość kompensacji do wartości zadanej położenia.

Wybór rodzaju kompensacji zależy od możliwości układu sterowania oraz od charakteru błędu. W przypadku błędu nieliniowego bardzo duże znaczenie ma wybór odstępu między punktami kompensacyjnymi. W przypadku gdy wykres błędu pozycjonowania ma charakter „łagodny” można zastosować mniejszą liczbę punktów natomiast gdy wykres jest „bardzo zmienny” wówczas należy zastosować większą liczbę punktów kompensacji.

#### 4. Kompensacja błędów osi w układzie sterowania TNC 407

W wykorzystywanym na ćwiczeniach układzie sterowania TNC 407 firmy Heidenhain możliwe jest kompensowanie: histerezy (luzu nawrotnego), błędu liniowego oraz błędu nieliniowego średniego. W przypadku osi obrotowych w tym sterowaniu możliwe jest tylko kompensowanie histerezy oraz błędu nieliniowego średniego.

Kompensację luzu nawrotnego przeprowadza się wprowadzając wartości błędu do parametrów maszynowych MP710.x (gdzie x numer osi X=0, Y=1 itd.) w jednostce mm z dokładnością do 0.001mm.

Kompensację błędu liniowego przeprowadza się wprowadzając wartość błędu do parametru maszynowego MP720.x (gdzie x numer osi X=0, Y=1 itd.) w jednostce mm/m z dokładnością do 0.001mm/m.

Kompensację błędu nieliniowego średniego przeprowadza się wprowadzając odpowiednie wartości do tabeli kompensacyjnej. Wartości kompensacji można wprowadzać w określonych odstępach, obliczanych ze wzoru:

$$\Delta = \frac{2^n}{10000}$$

gdzie:  $n = 0 \div 23$

Liczba punktów kompensacyjnych nie może być większa niż 256. Wartości kompensacji wprowadza się w mm z 3 miejscami po przecinku (0.001).

Dla danej osi może występować tylko kompensacji liniowa albo nieliniowa. Wybór rodzaju kompensacji następuje po wprowadzeniu odpowiedniego bitu do parametru maszynowego MP730. Wartość tego parametru np. %00001 odpowiada kolejno osiom obrabiarki 54ZYX gdzie 1 – oznacza kompensację nieliniową a 0 – kompensację liniową.

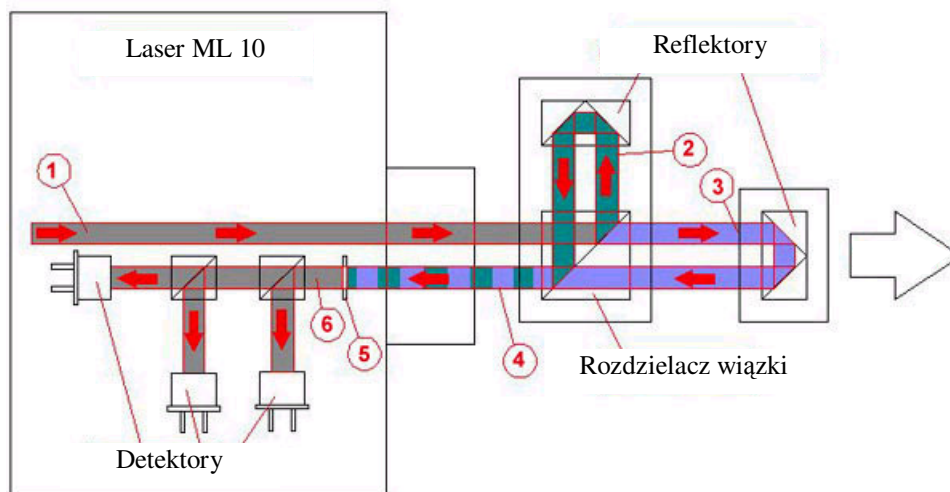
Wprowadzanie tych parametrów wymaga specjalnych uprawnień dlatego mogą być tylko wprowadzane przez prowadzącego ćwiczenia.

#### 4. Technologia pomiarów interferometrem laserowym

Pomiary interferometrem laserowym należą do najbardziej dokładnych technologii pomiarowych dzięki zastosowaniu światła o znanej dokładności fali jako jednostki długości. Lasery są stosowane ponieważ światło laserowe jest spójne i zawsze ma dokładnie taką samą długość fali. Długość fali światła laserowego helenowo-neonowego (HeNe) wynosi 0.633  $\mu\text{m}$ . Poprzez dalsze dzielenie długości fali można otrzymać rozdzielczość pomiarową 1.25 nm (ML10 Renishaw). Stabilność długości fali jest lepsza niż 0.1 ppm.

Interferometr mierzy zmianę przemieszczenia przez zliczanie liczby długości fal światła padającego na optyczny detektor. Interferometr Michelsona składa się z trzech elementów optycznych: rozdzielacz wiązki oraz dwóch reflektorów. Schemat interferometru laserowego w układzie pomiaru przemieszczeń liniowych przedstawiono na rys. 5.

Wiązka laserowa 1 emitowana z głowicy laserowej jest polaryzowana na wiązkę kołową z jedną częstotliwością światła. W rozdzielaczu wiązki w zwierciadle półprzepuszczalnym wiązka laserowa jest rozdzielana na dwie wiązki: wiązkę 2 odbita pod kątem 90° i wiązkę przepuszczoną 3. Obie wiązki mają takie same częstotliwości. Wiązki 2 i 3 po odbiciu w reflektorach są ponownie łączone w jedną wiązkę w rozdzielaczu wiązki 4.

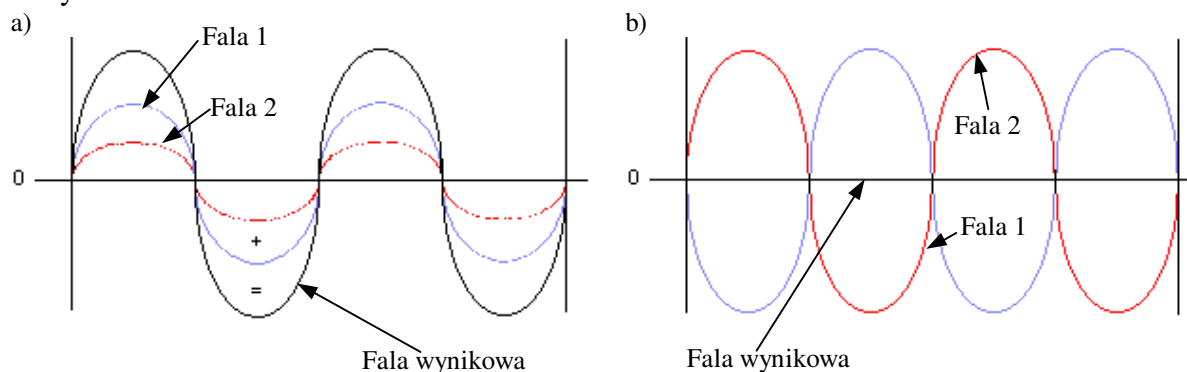


Rys. 5. Schemat interferometru laserowego: 1 – wiązka laserowa emitowana, 2 – wiązka laserowa odbita w rozdzielaczu wiązki, 3 – wiązka laserowa przepuszczona w rozdzielaczu wiązki, 4 – połączone w rozdzielaczu wiązki 2 i 3,

Przy pomiarze liniowym jeden reflektor jest zawsze sztywno połączony z rozdzielaczem wiązki. W czasie pomiarów jeden z elementów reflektor lub rozdzielacz wiązki może się przesuwać. Element nie przesuwany stanowi element referencyjny, a drugi element przesuwny. System laserowy rozpoznaje względne przemieszczenie pomiędzy reflektora i rozdzielacza wiązki. W czasie ruchu fale wiązek 2 i 3 są przesunięte względem siebie zgodnie z prawem Dopplera, a więc częstotliwości tych wiązek są różne. Różnica częstotliwości tych wiązek jest proporcjonalna do prędkości przemieszczenia.

Wiązka 4 składa się z dwóch nałożonych na siebie wiązek składowych. Przesunięcie faz tych dwóch składowych wiązek nie jest takie samo ponieważ mają różne przebyte drogi. Kiedy ta wiązka wchodzi do głowicy laserowej trafia na specjalny układ optyczny 5, który powoduje nakładanie tych dwóch składowych wiązek i wytwarza jedną spolaryzowaną 6.

W wyniku nakładania się tych dwóch składowych powstaje efekt interferencji fal tak jak na rys. 6.



Rys. 6. Interferencja fal: a) fazy jednakowe – plamka jasna, b) fazy przesunięte o 180° – plamka ciemna

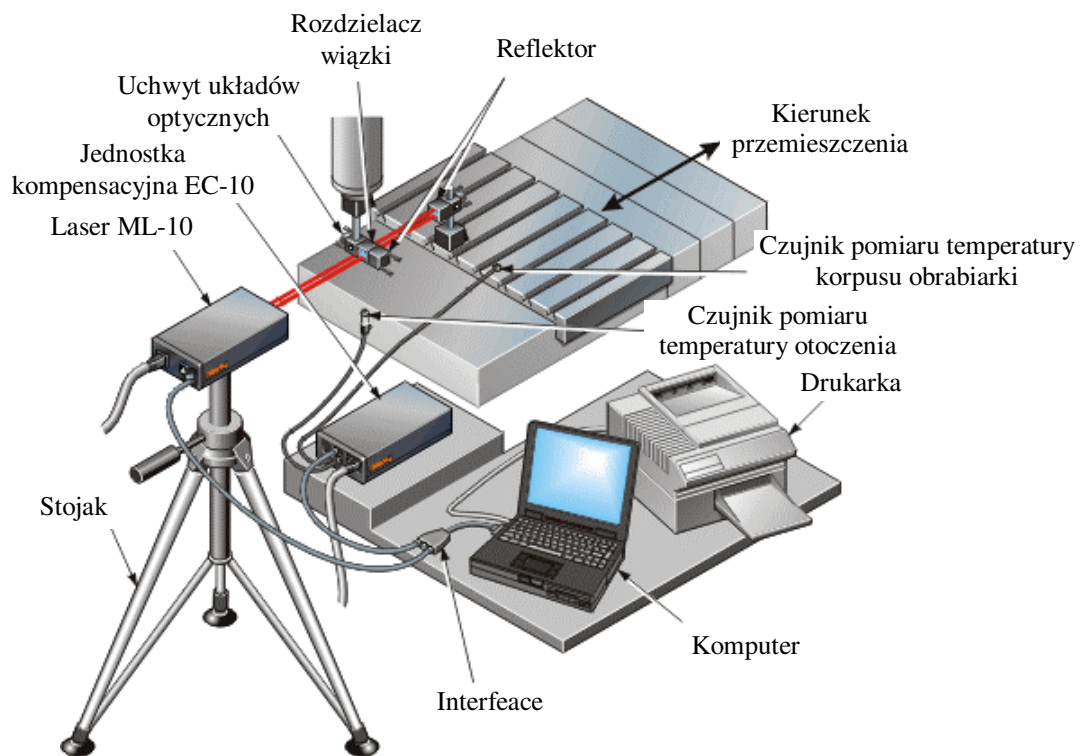
Wiązka ta trafia na soczewki trzech czułych detektorów. Dzięki skierowaniu wiązki pod kątem 90 stopni wytwarzane są na detektorach plamki ciemne oraz jasne. Detektory te wytwarzają sygnał sinusoidalny. Zastosowanie trzech detektorów eliminuje błędy fałszywych odbić oraz pozwala określić kierunek ruchu. Sygnał powstały w detektorze jest bardzo podobny do innych układów pomiarowych z sygnałem sinusoidalnym. Sygnał ten może być na drodze elektronicznej dzielony na krótsze odcinki – mniejsza rozdzielczość.

## 5. Opis stanowiska pomiarowego

Widok i budowę stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys 7.

Podstawowym wyposażeniem laserowego systemu pomiarowego ML-10 jest:

- laser ML-10 – laser emituje źródło światła o długości 633 nm,
- rozdzielacz wiązki (interferometer) – rozdziela wiązkę na dwie pod kątem 90 stopni,
- 2 reflektory – odbijające wiązkę,
- jednostka kompensująca EC-10 – wszystkie pomiary dokładności powinny być wykonywane w temperaturze 20 °C ze względu na rozszerzalność cieplną materiału (dla stali wynosi 11,7  $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$  a dla żeliwa 9  $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ ) . Ponieważ rzadko występuje dokładnie taka temperatura dlatego do systemu laserowego poprzez jednostkę EC-10 wprowadzane są odpowiednie poprawki, zależne od temperatury materiału (korpusu), temperatury powietrza, wilgotności powietrza oraz ciśnienia atmosferycznego,
- czujnik temperatury materiału (korpusu),
- czujnik temperatury i wilgotności powietrza,
- osprzęt mocujący.

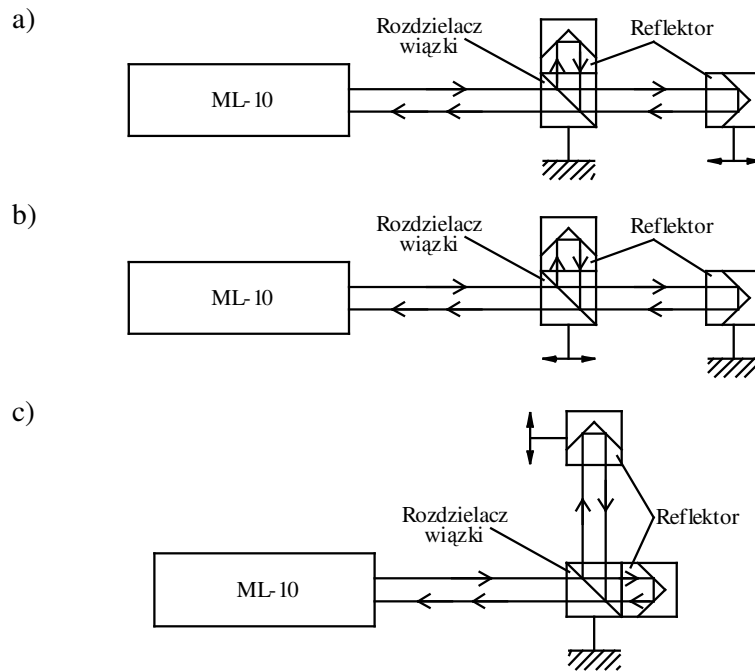


Rys. 7. Stanowisko pomiarowe

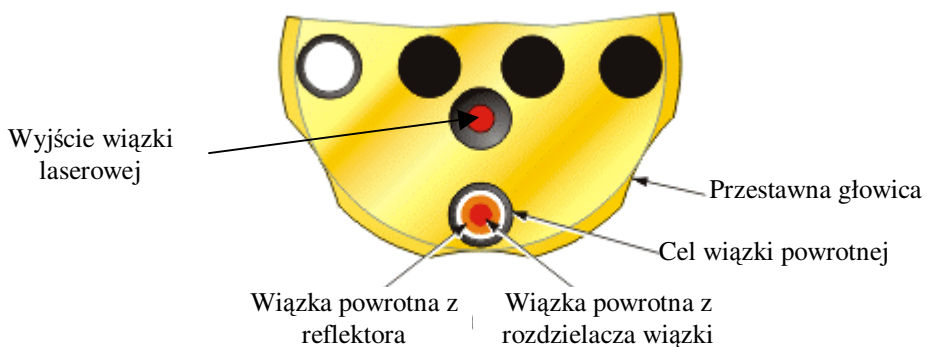
Zależnie od rodzaju mierzonej osi (pozioma-prostoliniowa, pozioma-prostopadła, pionowa) możliwe jest budowanie różnych konfiguracji układów optycznych (rys. 8).

## 6. Kalibracja układu

Do prawidłowego przeprowadzenia pomiarów należy odpowiednio wykalibrować układ optyczny. Kalibracja polega na dokładnie równoległym ustawieniu wiązki laserowej względem osi przesuwanym. Na rys. 9. pokazano głowicę laserową z miejscem wyjścia i powrotu wiązki laserowej. Powrotna wiązka laserowa musi w całym zakresie ruchu trafiać dokładnie w punkt docelowy.



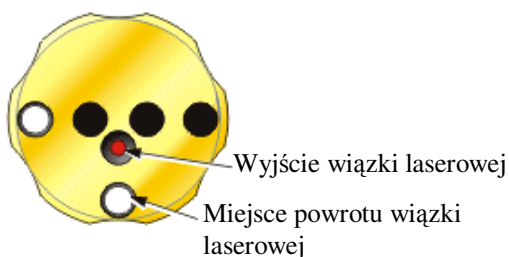
Rys. 8. Układy pomiarowe: a) i b) poziomy – prostoliniowy, c) poziomy – prostopadły, pionowy



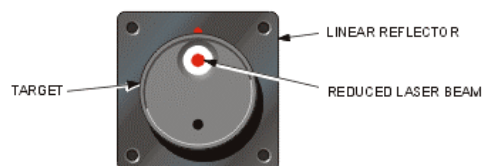
Rys. 9. Widok głowicy laserowej – ustawienie kalibracyjne

Dla ułatwienia kalibracji można użyć specjalnej kierownicy wiązki. W czasie kalibracji należy kolejno:

- ustawić laser na stojaku lub obrabiarce możliwie jak najdokładniej równoległe do ruchu osi mierzonej,
- połączyć układ elektryczny i włączyć laser (długi czas nagrzewania),
- głowicę laserową ustawić w pozycji kalibracyjnej (rys. 10),



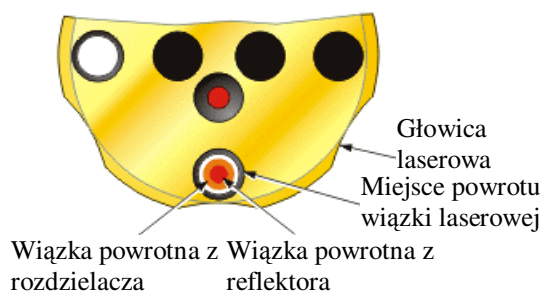
Rys. 10. Ustawienie głowicy laserowej w czasie kalibracji



Rys. 11. Ustawianie wiązki laserowej względem reflektora i rozdzielacza wiązki



- zmontować odpowiedni układ optyczny (rys. 8),
- przesunąć badaną oś obrabiarki tak aby zestawy reflektor i rozdzielacz wiązki były jak najbliżej siebie,
- zamontować układ optyczny na obrabiarce zwracając uwagę na stabilność zamocowania układu optycznego (układ optyczny należy zamontować na sztywnych elementach obrabiarki),
- tak ustawić laser oraz układ optyczny aby wiązka trafiała w odpowiedni punkt tarczy celowniczej zamontowanej na układzie optycznym (rys. 11),
- ustawić układ optyczny tak aby wiązka z rozdzielacza wiązki i reflektora trafiały w odpowiedni punkt na głowicy laserowej (po zdjęciu tarczy celowniczej) (rys. 12),
- zamontować kierownicę wiązki,
- skorygować ustawienie lasera lub kierownicy wiązki aby wiązka laserowa trafiała w odpowiednie miejsce w głowicy laserowej (rys. 10),
- przesunąć oś w drugie położenie krańcowe i przy pomocy dźwigni kierownicy wiązki ustawić wiązką tak aby trafiała w odpowiednie miejsce tarczy zamontowanej na przesuwym reflektorze,
- sprawdzić czy w całym zakresie ruchu wiązka powrotna trafia w punkt docelowy na głowicy laserowej, jeśli nie powtórzyć czynności kalibracyjne,
- sprawdzić w programie Laser10 czy moc wiązki w całym zakresie ruchu jest odpowiednia.



Rys. 12. Ustawienie wiązki laserowej

## 7. Konfiguracja pomiaru

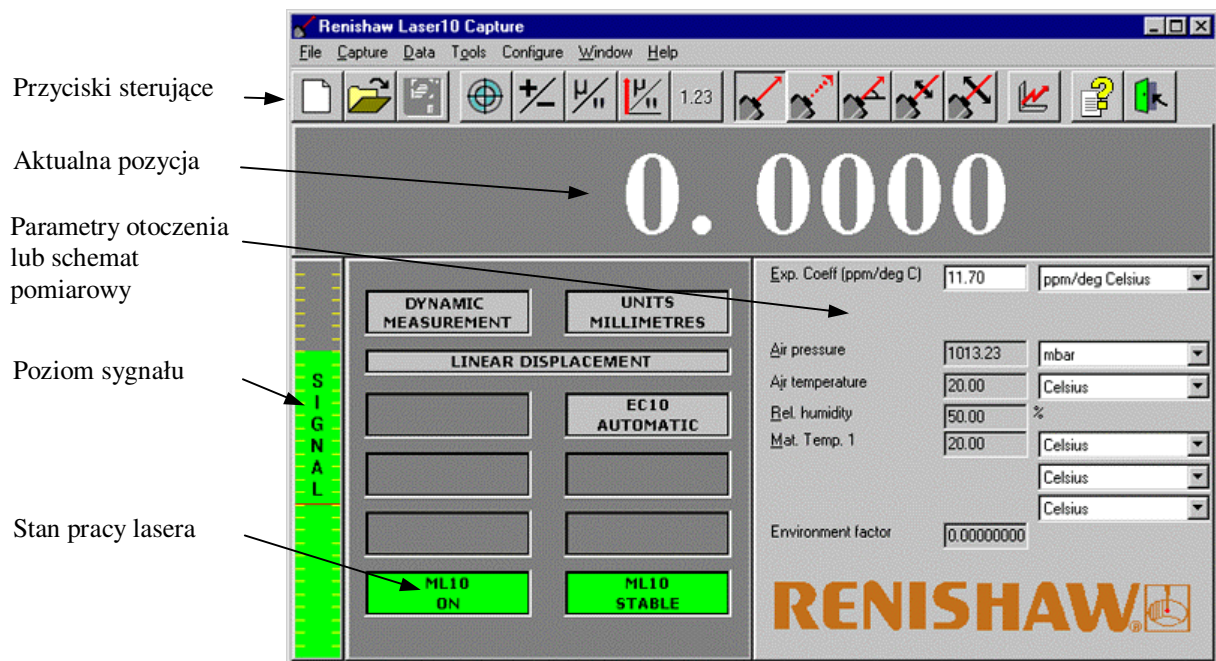
Konfiguracja pomiaru składa się z trzech zadań: opracowania schematu pomiarowego wg normy ISO-230 (patrz instrukcja do ćwiczenia nr 2 punkt 2), opracowania programu NC ruchu mierzonej osi obrabiarki oraz konfiguracji programu Laser10.

Dla przyjętego schematu pomiarowego (wg normy PN ISO-230) należy opracować program NC. Aby możliwe było automatyczne uruchomienie pomiaru pomiędzy poszczególnymi ruchami należy wprowadzić zatrzymanie czasowe na czas ok. 4s.

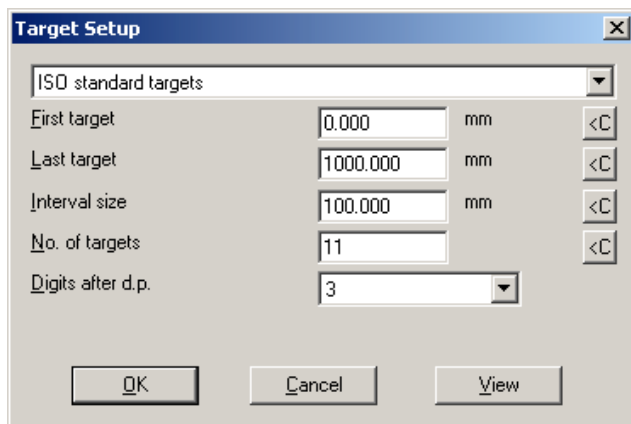
Pakiet programów Laser10 służy do wykonywania pomiarów laserowym systemem pomiarowym ML10. Do pomiarów liniowych przeznaczony jest program „Linear Measurement” (rys. 13).

W celu dokonania pomiarów należy wykonać następujące czynności w programie „Linear Measurement”:

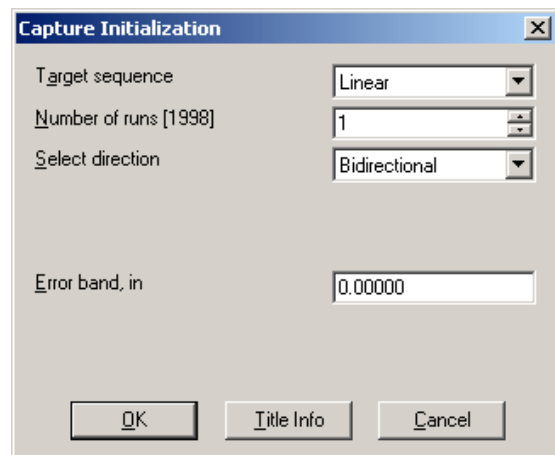
- ustawić warunki pomiaru – w tym celu należy z górnego menu wybrać opcję „Targets”, następnie wybrać „Automatic Setup”. Po ukazaniu się okienka (rys. 14) należy wybrać z listy: „ISO standard targets”, następnie wprowadzić współrzędną pierwszego punktu pomiarowe-go „First target”, współrzędną ostatniego punktu pomiarowe-go „Last target” oraz odstęp między punktami pomiarowymi „Interval size”. Pozostałe dane zostaną obliczone automatycznie i wstawione. Zatwierdzenie wartości następuje klawiszem OK.



Rys. 13. Okno programu Laser10

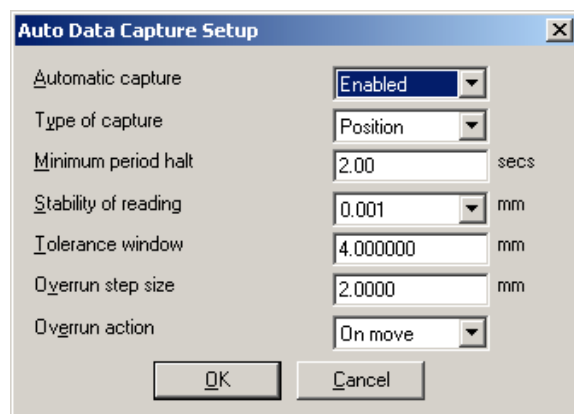


Rys. 14. Wprowadzanie cyklu i punktów pomiarowych



Rys. 15. Ustawienie danych pomiarowych

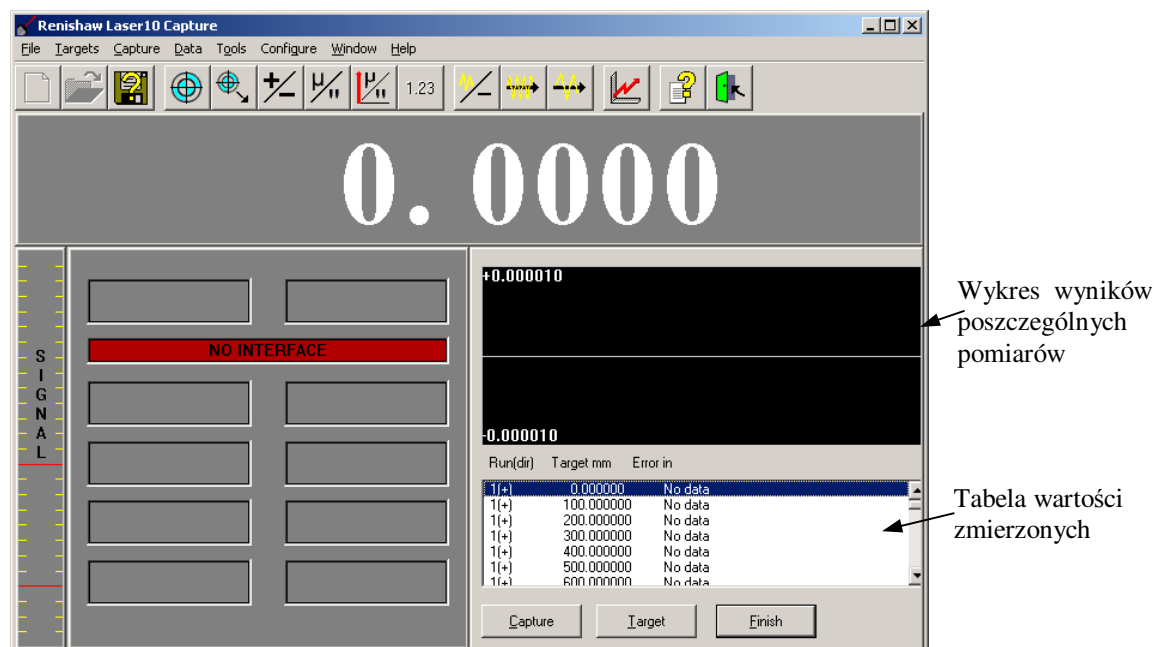
- ustawić dane cyklu pomiarowego – należy w górnym menu wybrać opcję „Capture”, a następnie „Start”. W oknie „Capture Initialization” (rys. 15) należy wybrać rodzaj ruchu („Target sequence”) „Linear”, liczbę przejazdów („Number of runs”) zgodnie z normą dla pomiarów dokładności wartość od 3 do 5, kierunek ruchu („Select direction”) „Bidirectional” – dwukierunkowo. W opcji „Title Info” można wprowadzić informacje o obrabiarce i warunkach pomiaru. Akceptacja klawiszem OK.
- ustawić dane cyklu automatycznego



Rys. 16. Ustawienie danych cyklu pomiaru automatycznego

pomiaru (rys. 16) – w tym oknie należy wprowadzić wartości tak jak na rys. 16. Wciśnięcie klawisza OK. rozpoczyna pomiar.

Po wprowadzeniu niezbędnych danych można przystąpić do pomiarów. Przed uruchomieniem pomiarów po przesunięciu osi mierzonej na punkt 0 należy wyzerować układ pomiarowy lasera przez naciśnięcie klawisza Ctrl+D. Należy zwrócić również uwagę w czasie wykonywania pomiarów na znak wartości, który można zmienić przyciskiem +/-



Rys. 17. Okno programu laser10 w czasie wykonywania pomiarów

W czasie wykonywania pomiarów okno programu laser10 ma postać jak na rys. 17.

Po zakończeniu pomiarów otrzymane wyniki należy zapisać na dysk. Następnie należy przejść do okna analizy otrzymanych wyników po naciśnięciu klawisza. I wydrukować arkusz „ISO 230-2 1997 Analysis plot” w menu „Analysis”.

Gdy otrzymane wyniki parametrów dokładności są niezadowalające należy przeprowadzić kompensację błędów osi. Wartość błąd liniowego oraz wartość luzu nawrotnego można odczytać bezpośrednio z wykresu „ISO 230 1997 Analysis plot”. Natomiast w przypadku występowania błędu nieliniowego należy w menu „Analysis” wybrać opcję „Error Compensation Table” i wydrukować tabelę parametrów kompensacji.

## 8. Przebieg ćwiczenia

- wybrać odpowiedni układ pomiarowy zależnie od mierzonej osi,
- połączyć układ pomiarowy zgodnie z rys. 7,
- zamontować układ pomiarowy na obrabiarce,
- przeprowadzić kalibrację układu,
- skonfigurować układ pomiarowy: opracować program NC w języku Haidenhain oraz ustawić program Laser10,
- wykonać pomiar dokładności pozycjonowania mierzonej osi,
- przeprowadzić analizę otrzymanych wyników,
- w przypadku niezadowalających wyników przeprowadzić kompensację błędu osi,
- wykonać powtórny pomiar dokładności pozycjonowania mierzonej osi,
- rozmontować układ.

## 9. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

- datę ćwiczenia nr grupy i podgrupy,
- nazwiska osób biorących udział w ćwiczeniu,
- arkusz wyniku pomiaru dokładności przed kompensacją,
- wartości parametrów kompensacji osi,
- arkusz wyniku pomiaru dokładności po kompensacji,
- wnioski ze zwróceniem uwagi na otrzymane parametry:  $A$ ,  $B$ ,  $R$ ,  $R\uparrow$ ,  $R\downarrow$ ,  $\overline{B}$  ,.

## 10. Wymagania

Przed przystąpieniem do ćwiczeń należy zapoznać się z przedmiotem normy ISO-230 (punkt 2 instrukcji do ćwiczenia nr 2), budową laserowego układu pomiarowego oraz metodami kompensacji błędów osi.

## 11. Literatura

1. Norma ISO-230
2. Instrukcja nr 2 do ćwiczenia „Badanie dokładności pozycjonowania osi obrotowych sterowanych numerycznie”