

## OCENA JAKOŚCI ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO NA PODSTAWIE POMIARÓW JEGO CHARAKTERYSTYK FUNKCJONALNYCH

*Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono rozważania dotyczące jakości robota przemysłowego. Jakość robota przemysłowego jest analizowana z punktu widzenia zapewnienia wydolności procesu produkcji w którym robot jest zastosowany. Jakość robota jest określona za pomocą parametrów funkcjonalnych zdefiniowanych w PN-EN 29283. Opisany został również system pomiarowy służący do oceny właściwości robota. System ten o nazwie ROBOTEST, produkcji firmy Polytec GmbH/Niemcy pracuje w oparciu o interferometr Macha-Zehndera oraz detektory półprzewodnikowe PSD. System ten został specjalnie zaprojektowany do wykonywania badań robotów przemysłowych zgodnie z wyżej wymienioną normą.*

*Abstract: In this study the consideration dealing with the quality of industrial robots are discussed. The quality of industrial robot is analysed from the point of view of capability of a production process where the robot is employed. The quality of the robot is determined by the parameters of performance defined in the standard PN-EN 29283. The measurement system for the evaluation of the performance of the robot is also discussed. This system, called the ROBOTEST, developed by Polytec GmbH/Germany is based on the Mach-Zehnder interferometer and PSD detectors; it is especially designed to conduct the tests according to the previously mentioned standard.*

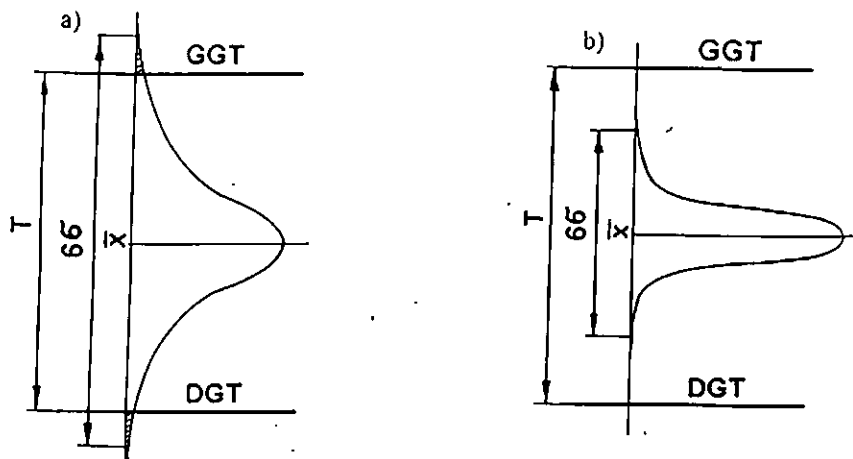
### 1. WSTĘP

Termin „jakość” jest trudny do ścisłego zdefiniowania. Istnieje wiele różnych definicji jakości. Najkrótsza z nich określa „jakość” jako zdolność do spełnienia wymagań. W normie terminologicznej dotyczącej jakości [1] podana jest definicja jakości jako ogółu cech i właściwości wyrobu lub usługi decydujących o zdolności wyrobu lub usługi do zaspokojenia stwierdzonych lub przewidywanych potrzeb. Nowoczesne podejście do jakości uwzględnia ekonomiczny aspekt uzyskania jakości, jak również celowość planowania działań jakościowych na wszystkich etapach powstawania wyrobu lub usługi począwszy od projektowania i produkcji, a skończywszy na serwisie i konserwacji wyrobu [3]. Praca niniejsza koncentruje się na problemach zapewnienia jakości w procesach technologicznych w których są stosowane roboty przemysłowe.

Przedstawiono rozważania dotyczące oceny jakości procesu oraz właściwego doboru robotów przemysłowego na podstawie znajomości jego charakterystyk funkcjonalnych. Zakłada się, że wymagania technologiczne są określone przez podanie górnych i dolnych granic tolerancji procesu. Opisano system pomiarowy ROBOTEST umożliwiający wyznaczanie charakterystyk funkcjonalnych zgodnie z normą [2].

## 2. WSKAŹNIKI WYDOLNOŚCI PROCESU

Odpowiednia jakość procesu technologicznego jest tworzona już podczas projektowania i kompletacji wyposażenia technologicznego. Właściwy dobór robotów przemysłowych powinien zapewniać realizację procesów o założonej jakości. Przyjęto stosować miarę jakości procesów w postaci wskaźników liczbowych  $c_p$  oraz  $c_{pk}$ . Wskaźniki te umożliwiają ocenę jakości procesów w postaci liczbowej co ułatwia ich porównanie. Wskaźnik  $c_p$  określa zależność między zakresem tolerancji podanym w wymaganiach technicznych, a odchyleniem standardowym  $\sigma$  procesu (Rys 1):



Rys 1. Wskaźnik wydolności procesu  $c_p$  (ang. process capability)  
a) proces niewydolny, proces wydolny

Wskaźnik  $c_p$  wyraża się wzorem:

$$c_p = (GGT - DGT) / 6\sigma \quad (1)$$

gdzie:

GGT- górna granica tolerancji,

DGT- dolna granica tolerancji,

T - tolerancja (rysunkowa, technologiczna, odbioru jakościowego),

$6\sigma$  - przybliżona szerokość rozrzutu przypadkowego procesu równa 6 odchyleniom standardowym,

$\bar{x}$  - wartość średnia parametru procesu .

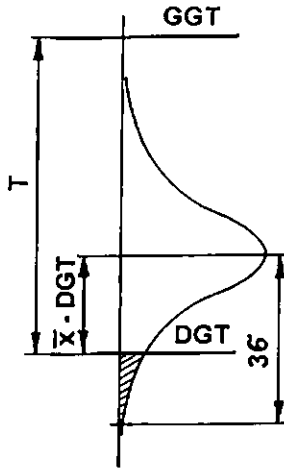
jeśli zachodzi równość

$$\bar{x} = (GGT - DSGT) / 2 \quad (2)$$

to proces nazywa się procesem wycentrowanym.

Wartość  $c_p < 1$  oznacza, że przypadkowa zmienność procesu jest większa niż zakres tolerancji  $T$  (Rys. 1a). Proces taki jest niewydolny, co oznacza, że część produkowanych wyrobów lub wykonywanych operacji może nie spełniać wymagań jakościowych. Poprawę wydolności procesu można uzyskać przez zastosowanie innego (na ogół bardziej kosztownego) wyposażenia technologicznego, które zapewni mniejszą wartość rozrzutu przypadkowego  $6\sigma$ .

Jeżeli równanie 2) nie jest spełnione to wówczas konieczne jest stosowanie wskaźnika  $c_{PK}$  (Rys 2):



Rys 2. Wskaźnik wydolności  $c_{PK}$  procesu (ang. critical process capability).

Wskaźnik  $c_{PK}$  określa położenie rozkładu względem zakresu tolerancji.

Wskaźnik ten wyraża się wzorem:

$$c_{PK} = \min [(GGT - \bar{x})/3\sigma, (\bar{x} - DGT)/3\sigma] \quad (3)$$

Jeśli proces jest wycentrowany to wówczas:

$$c_p = c_{PK} \quad (4)$$

Przyjmuje się, że jeśli:

$$c_p < 1. \text{ to proces jest niewydolny} \quad (5)$$

$$1 \leq c_p \leq 1.33 \text{ to proces jest ograniczenie wydolny} \quad (6)$$

$$1.33 < c_p \text{ to proces jest wydolny} \quad (7)$$

Wyższa wartość wkaźnika  $c_p$  oznacza lepszą wydajność procesu i mniejszą liczbę braków.

Zaleca się, aby wartości  $c_p$  były co najmniej równe 1,67. Niektóre firmy samochodowe podają, że realizują procesy produkcyjne przy jeszcze wyższych wartościach  $c_p$  (np. BMW -  $c_p = 2$ , VW -  $c_p = 1,68$ ).

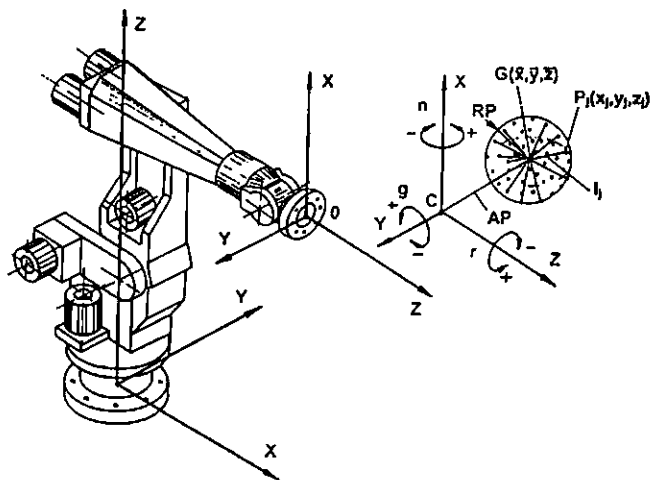
### 3. CHARAKTERYSTYKI FUNKCJONALNE

Charakterystyki funkcjonalne robotów przemysłowych zostały znormalizowane. Podstawową normą określającą metody badań robotów i wyznaczenie charakterystyk funkcjonalnych jest norma [2]. Opisane w normie metody badań mogą być wykorzystywane do weryfikacji dokumentacji pojedynczego robota, badań prototypu, badań typu i badań odbiorczych. Opisane w normie [2] metody badań dotyczą wyznaczania 16 różnych charakterystyk funkcjonalnych dokładności i powtarzalności robota przemysłowego.

W załączniku do normy [2] podano zalecenia i kryteria wyboru badań dla różnych typowych aplikacji robota przemysłowego takich jak np. sprawianie łukowe, zgrzewanie, montaż itp. W przypadku robotów programowanych metodą uczenia (ang. teach-in) szczególne znaczenie mają charakterystyki powtarzalności, a w tym najczęściej stosowane charakterystyki powtarzalności pozycjonowania jednokierunkowego (RP) oraz powtarzalności odtwarzania prostoliniowego toru ruchu (RT).

#### 3.1 Powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego (RP)

Powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego (RP) jest wyznaczana w punktach P1-P5 leżących na przekątnych prostokąta wyznaczającego płaszczyznę rozpiętą na przekątnych sześcianu pomiarowego. Sześcian pomiarowy wpisany jest w przestrzeń roboczą manipulatora badanego robota. Sześcian powinien być umieszczony w tej części przestrzeni roboczej, która według przewidywań będzie najbardziej wykorzystywana. Wyznaczenie powtarzalności pozycjonowania wymaga wykonania serii 30 przestrzennych pomiarów położenia końcówki ramienia robota (Rys.3):



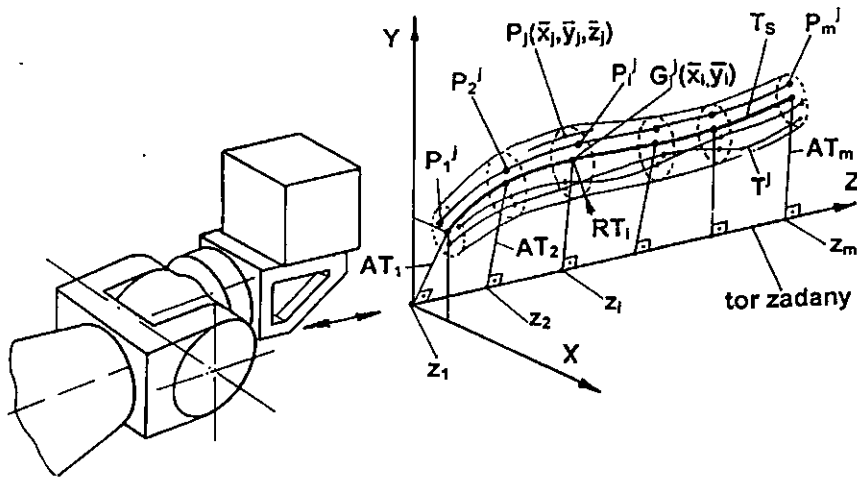
Rys.3 Wyznaczanie powtarzalności (RP) pozycjonowania robota przemysłowego  
 C - punkt zadany,  $P_j (x_j, y_j, z_j)$  - punkt rzeczywisty uzyskany przy j-tym dochodzeniu końcówki ramienia do punktu zadanego.  $G(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  - Środek zbioru punktów przestrzeni roboczej.

uzyskany przez  $n$ -krotne dochodzenie do położenia zadanego,  $l_j$  - odległość między  $G(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  a  $P_j$ ,  $n, g, r$  - współrzędne kątowe, AP- dokładność pozycjonowania (nie jest przedmiotem rozważań w niniejszej pracy)

Wartość parametru RP określającego powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego wyznacza się na podstawie wzorów podanych w p. 7.2.2 normy.

### 3.2 Powtarzalność odtwarzania prostoliniowego toru ruchu (RT)

Wyznaczenie powtarzalności (RT) odtwarzania prostoliniowej trajektorii ruchu wymaga wykonania pomiarów przestrzennych położenia końcówki ramienia robota podczas jej ruchu w kierunku osi  $z$ . Zazwyczaj zakłada się, że ruch odbywa się wzdłuż osi  $z$  układu współrzędnych  $x, y, z$  związanego z interfejsem mechanicznym manipulatora badanego robota. Przyjmuje się wykonanie 10 ruchów w kierunku  $+z$  oraz 10 ruchów w kierunku przeciwnym (Rys. 4):

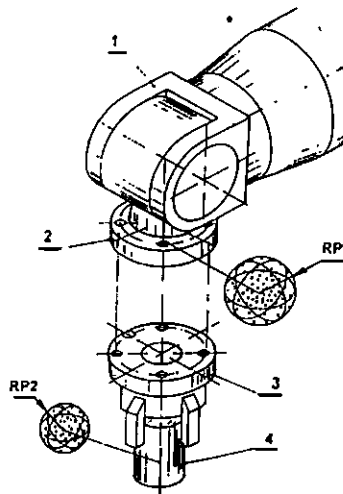


Rys 4 Wyznaczanie powtarzalności (RT) odtwarzania prostoliniowego toru ruchu.. oś  $z$  - stanowi tor zadany, RT- powtarzalność odwzorowania,  $P_j^j$  - punkt rzeczywistego toru pomiarowego, odpowiadający punktowi pomiarowemu  $z_i$  przy  $j$ -tym powtórzeniu odwzorowania,  $P_i^j$  - punkt toru pomiarowego odpowiadający punktowi pomiarowemu  $z_i$  przy  $j$ -tym powtórzeniu odwzorowania.,  $G_i^j(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$  - środek zbioru punktów wyznaczony z  $n$  pomiarów dla każdego punktu pomiarowego ( $m$ ) wzdłuż toru,  $T_s$  - trajektoria wyznaczona przez środki zbiorów punktów  $G_i^j$ ,  $T_j$  - trajektoria przy  $j$ -tym powtórzeniu odwzorowania, AT- dokładność odwzorowania toru, (nie jest przedmiotem rozważań w niniejszej pracy).

Wartość parametru RT wyznacza się na podstawie zebranych wyników pomiarów z zastosowaniem wzorów podanych w p. 8.3 normy [2].

## 4. OCENA ZDOLNOŚCI PROCESU

Charakterystyki funkcjonalne robota wymienione w p.3 odnoszą się najczęściej do środka interfejsu mechanicznego robota (Rys.5) :



Rys 5. Wpływ powtarzalności pozycjonowania narzędzia (RP2) na całkowitą powtarzalność pozycjonowania układu robot-narzędzie. 1-robot, 2-interfejs mechaniczny, 3-chwytnak, 4 - chwytny przedmiot . (RP1) - powtarzalność pozycjonowania robota odniesiona do środka interfejsu mechanicznego robota.

O ile metoda pomiarowa tego wymaga, wartości RP, RT mogą być odnoszone względem innego punktu o znanych współrzędnych względem środka interfejsu mechanicznego robota. Zamocowane na ramieniu robota narzędzie w postaci chwytnika, palnika itp wywiera wpływ na jakość procesu ponieważ wprowadza dodatkowy przypadkowy rozrzut pozycjonowania/odzworowania.

W ogólnym przypadku podczas realizacji operacji pozycjonowania robota wskaźnik zdolności procesu  $c_p$  powinien wyrażać się wzorem:

$$c_p = (GGT - DGT) / (2 \sum RP_i) \quad (8)$$

gdzie :

GGT, DGT według Rys 1

$\sum RP_i$  - sumaryczny rozrzut pozycjonowania układu robot - wyposażenie technologiczne mocowane na ramieniu robota

Jeśli wartość  $T = GGT - DGT$  jest dana i wynika z wymagań technologicznych to odpowiednią wartość wskaźnika zdolności procesu  $c_p$  wynika z zastosowanego robota przemysłowego i oszacowania wartości  $\sum RP_i$ .

Oczywiście wysoka wartość  $c_p$  wiąże się z koniecznością stosowania lepszego i droższego wyposażenia technologicznego.

Oszacowanie wartości RP wymaga stosowania odpowiedniego urządzenia pomiarowego. Przykładem takiego urządzenia jest system pomiarowy ROBOTEST będący na wyposażeniu

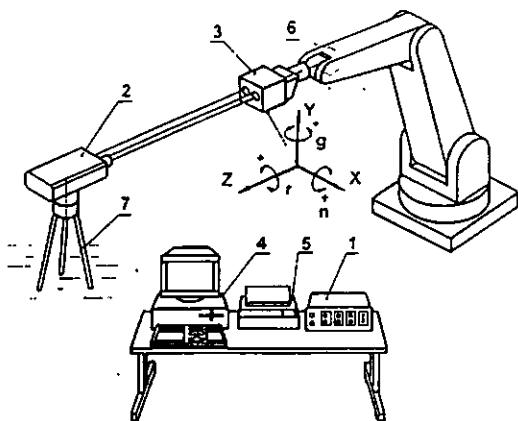
akredytowanego w PCBC Laboratorium Badania Przemysłowych Urządzeń Automatyki i Robotyki PIAP-LAB. System ten umożliwia wykonywanie badań robotów wg normy [2].

## 5. SYSTEM POMIAROWY ROBOTEST

Wyznaczanie charakterystyk funkcjonalnych robota przemysłowego przy użyciu dotykowych narzędzi pomiarowych jest trudne. Istnieje bowiem niebezpieczeństwo uderzenia ramienia robota w czujnik pomiarowy co grozi jego uszkodzeniem. System pomiarowy ROBOTEST umożliwia wykonywanie bezdotykowych pomiarów położenia końcówki ramienia robota oraz automatyczne obliczanie parametrów funkcjonalnych na podstawie zebranych wyników pomiarów.

### 5.1 Ogólna charakterystyka

System pomiarowy ROBOTEST jest laserowym interferometrycznym systemem pomiarowym, przeznaczonym do pomiarów względnych. Schemat systemu przedstawiono na Rys. 6:



Rys. 6. System pomiarowy ROBOTEST - Schemat budowy.

- 1-procesor sygnałowy OMS 600, 2- interferometr OMS 610,
- 3-głowica sensorowa OMS 620, 4- procesor danych OMS 650 (PC)
- 5-drukarka, 6-badany robot przemysłowy.7-statyw

Przestrzenią pomiarową jest wyobraźalny walec o średnicy 20mm i maksymalnej długości 10.000mm.

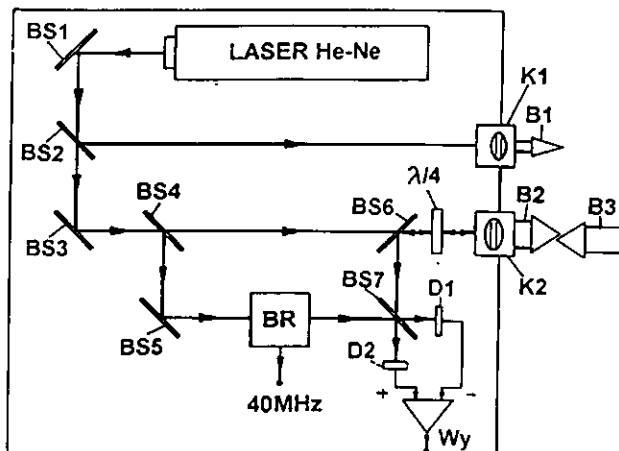
W systemie zastosowano laser He-Ne o długości fali  $\lambda = 633\text{nm}$ . Moc wyjściowa lasera jest mniejsza niż 1 mW, a więc system zalicza się do urządzeń klasy 2 wg klasyfikacji podanej w normie [5]. Oznacza to, że podczas użytkowania urządzenia nie ma wymogu stosowania środków ochronnych.

Pomiar współrzędnej „z” (Rys. 6) jest pomiarem interferencyjnym. Do pomiarów współrzędnych x, y oraz do pomiarów kątowych zastosowano analogowe detektory położenia PSD (ang. Position Sensitive Detector), które umożliwiają uzyskanie rozdzielczości lepszej niż 10 $\mu\text{m}$ . Maksymalna prędkość mierzona wzdłuż osi „z” wynosi 10 m/s. Dokładność pomiaru współrzędnej „z” zależy od prędkości. Producent podaje, że przy prędkości 10 m/s uzyskuje się rozdzielczość pomiaru +/- 3  $\mu\text{m}$ , zaś przy prędkości 1 m/s rozdzielczość pomiaru wynosi

0,3 $\mu$ m. System umożliwia również pomiar odchyżeń kątowych  $\pm 3^{\circ}$  względem trzech współrzędnych x, y, z przy rozdzielczości lepszej niż  $\pm 0,003^{\circ}$ .

## 5.2 Układ optyczny

Pomiar przemieszczenia głowicy sensorowej wzdłuż osi z jest dokonywany przy użyciu interferometru Macha - Zehndera, którego schemat uproszczony przedstawiono na Rys. 7. W obudowie interferometru umieszczono również układ formowania wiązki pomocniczej B1 kierowanej w stronę głowicy sensorowej (Rys. 8). Układ ten składa się z rozdzielacza promieni BS1 i układu optycznego kolimatora K1. Spolaryzowany liniowo promień światła laserowego (płaszczyzna polaryzacji jest nachylona pod kątem  $45^{\circ}$  do płaszczyzny rysunku) pada na rozdzielacz promieni BS4 gdzie część wiązki ulega odbiciu i jest kierowana do modulatora BR, zaś pozostała część przechodzi i trafia do rozdzielacza BS6. Płytką ćwierćfalowa  $\lambda/4$  sprawia, że wiązka powracająca B3 w całości jest odbijana przez rozdzielacz BS6 i trafia do rozdzielacza BS7, gdzie ulega interferencji z wiązką padającą z modulatora BR. Przebieg czasowy sygnałów powstających na detektorach D1 i D2 po wykorzystaniu zjawiska Dopplera umożliwia wyznaczenie prędkości ruchu głowicy sensorowej w kierunku osi z.



Rys. 7 Interferometr

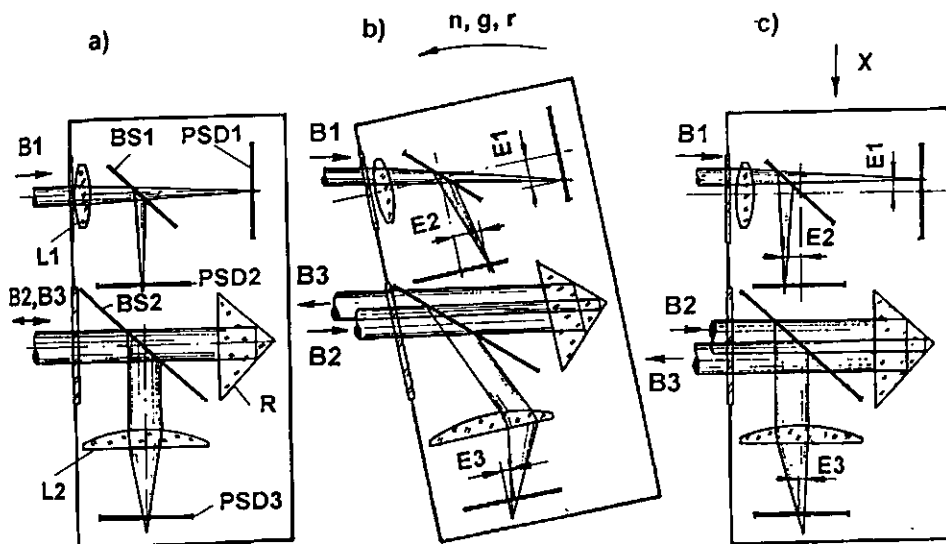
BS1-BS7 rozdzielacze promieni, B1-promień pomocniczy, B2-promień wychodzący interferometru, B3-promień wracający, BR-modulator akustyczno-optyczny, D1-D2 detektory,  $\lambda/4$ -płytką ćwierćfalowa, K1-K2 układy optyczne kolimatorów.

Jak już wspomniano, pomiary przemieszczenia głowicy sensorowej w kierunku poprzecznym do osi „z” tzn. w płaszczyźnie x, y oraz pomiary odchyżeń kątowych są realizowane przy użyciu analogowych sensorów położenia PSD. W głowicy sensorowej znajdują się trzy sensory PSD (Rys. 8) na których powstają sygnały umożliwiające wyznaczenie zarówno liniowych jak i kątowych odchyżeń położenia głowicy sensorowej. Z interferometru są kierowane do głowicy sensorowej dwie równoległe wiązki światła laserowego. Osie optyczne obu wiązek są oddalone od siebie o 50mm.

Wiązka B1 o średnicy 5 mm po przejściu przez soczewkę skupiającą L1 pada na zwierciadło półprzepuszczalne BS1. Przechodząca część wiązki pada na analogowy element półprzewodnikowy PSD1, zaś część wiązki która uległa odbiciu pada na podobny element PSD2. Wiązka



B2 o średnicy 20mm pada na zwierciadło półprzepuszczalne BS2, gdzie część wiązki ulega odbiciu i po zogniskowaniu w układzie optycznym L2 pada na element PSD3. Przechodząca część wiązki pada na zwierciadło pryzmatyczne R, gdzie ulega odbiciu i w całości przechodzi przez zwierciadło BS2 i wraca do interferometru jako wiązka B3 (Rys. 7). Podczas ruchu obrotowego głowicy (Rys. 8b) oraz ruchu liniowego (Rys. 8c) na elementach PSD1- PSD3 powstają sygnały E1-E3, które umożliwiają wyznaczenie liniowych i kątowych odchyłeń położenia głowicy sensorowej podczas ruchu ramienia badanego robota.



Rys. 8 Głowica sensorowa.

Bieg promieni świetlnych w głowicy sensorowej podczas jej przemieszczania..

a) położenie wyjściowe, b) obrót głowicy, c) przesunięcie liniowe B1 promień pomocniczy, B2- promień padający , B2-promień wracający, L1,L2 układy optyczne, PSD1-PSD3 czujnikowe elementy półprzewodnikowe, R-zwierciadło pryzmatyczne (retroreflektor), E1-E3 zmiany miejsc padania promieni na elementy PSD podczas ruchu głowicy.

## 6. ZAKOŃCZENIE

W niniejszej pracy zaproponowano ocenę jakości robota przemysłowego na podstawie możliwości do uzyskania wartości wskaźników wydolności procesu. Wyznaczenie tych wskaźników wymaga oceny charakterystyk funkcjonalnych robota. Opisano system pomiarowy ROBOTEST umożliwiający wyznaczenie tych charakterystyk zgodnie z normą [2]. Opisany system pomiarowy umożliwia wyznaczenie charakterystyk funkcjonalnych odnoszących się zarówno do współrzędnych liniowych jak i kątowych. System jest przenośny co umożliwia

jego wykorzystanie nie tylko w laboratorium badawczym ale również w hali produkcyjnej, co pozwala na sprawdzenie robota bez potrzeby jego demontażu ze stanowiska i przewożenia do laboratorium. System umożliwi również pomiar parametrów ruchu innych urządzeń takich jak np. suwnice lub tory jezdne.

## LITERATURA

- [1]. PN-EN 28402: 1993. *Jakość. Terminologia*
- [2]. PN-EN 29283:1992: *Roboty przemysłowe. Metody badania charakterystyk funkcjonalnych.*
- [3]. PN-EN 29004: 1993: *Zarządzanie jakością i elementy systemu jakości. Wytyczne.*
- [4]. PN-EN 29946: 1994: *Roboty przemysłowe . Przedstawianie charakterystyk.*
- [5]. PN-91/T-06700: *Bezpieczeństwo przy promieniowaniu emitowanym przez urządzenia laserowe. Klasyfikacja sprzętu. Wytyczne dla użytkownika,*
- [6]. *Glossary of terms used in the management of quality.* EOQC Glossary Committee - Sixth Edition - June 1989
- [7]. Bauer H.: *Lasertechnik: Grundlagen und Anwendungen.* Würzburg. Vogel Verlag 1991.
- [8]. Juran J.M. Gryna F.M. - *Jakość - projektowanie - analiza,* WNT, W-wa 1974r.
- [9]. Klimasara W.: *Bezdotykowa metoda pomiaru parametrów funkcjonalnych robotów przemysłowych z wykorzystaniem laserowego systemu pomiarowego „ROBOTEST”* Materiały V Krajowej Konferencji Robotyki. Wrocław 1996.
- [10]. *ROBOTEST OPERATOR'S MANUAL for Polytec Robotest System .* Polytec 1994.