

# WZORCOWANIE WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWYCH RAMION POMIAROWYCH (WRP)

Jerzy SŁADEK\*, Grzegorz SOKAL\*\*, Ksenia OSTROWSKA\*, Artur KMITA\*

\* Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji,  
Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

\*\* Akademia Pedagogiczna im. KEN w Krakowie, Wydział Matematyczno-Fizyczno-Techniczny,  
Katedra Informatyki i Metod Komputerowych, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków

[sladek@mech.pk.edu.pl](mailto:sladek@mech.pk.edu.pl), [Sokal@inf.ap.krakow.pl](mailto:Sokal@inf.ap.krakow.pl),  
[Ostrowska@m6.mech.pk.edu.pl](mailto:Ostrowska@m6.mech.pk.edu.pl), [kmita@m6.mech.pk.edu.pl](mailto:kmita@m6.mech.pk.edu.pl)

**Streszczenie:** Wzrost wymagań odnośnie jakości produkcji przy często zmieniającym się jej asortymencie stwarza warunki wykorzystania uniwersalnych narzędzi pomiarowych takich jak systemy współrzędnościowe. Konieczność objęcia pomiarem miejsc trudno dostępnych dla klasycznych maszyn pomiarowych wymaga stosowania systemów z rotatorycznymi parami kinematycznymi. Do najpowszechniej obecnie stosowanych systemów można zaliczyć roboty przemysłowe przystosowane do zadań pomiarowych oraz przede wszystkim współrzędnościowe ramiona pomiarowe (WRP). Planując wykorzystanie tego typu urządzeń pomiarowych należy przeanalizować ich dokładność w warunkach kontrolnego pomiaru długości. W artykule zaproponowano wykorzystanie norm oraz zaleceń dotyczących sprawdzania i wzorcowania współrzędnościowych maszyn pomiarowych do zadania wzorcowania WRP. Przeprowadzona kalibracja WRP z wykorzystaniem płyty kulowej posłużyła jako punkt wyjściowy do określenia obszaru błędów granicznych ( $MPE$ ) i niepewności wyznaczenia błędu wskazania. Słowa kluczowe: Współrzędnościowe Ramiona Pomiarowe, niepewność pomiaru, kalibracja,  $MPE_p$ ,  $MPE_E$ .

## 1. WPROWADZENIE

Pierwsze ramiona pomiarowe zostały opatentowane w roku 1973. Początkowo zakres ich zastosowań ograniczał się do pomiaru elementów instalacji, rur czy prostego odtwarzania wymiarów modeli, przez projektantów form przemysłowych. Szybko jednak zauważono ich zalety, oraz dostrzeżono potencjalnie szeroki zakres zastosowań, jako systemów mobilnej metrologii współrzędnościowej. Wykorzystanie, bowiem, ramion pomiarowych jako narzędzi mobilnej kontroli dokładności pozwala na znaczne przyspieszenie procesu pomiaru bezpośrednio na stanowisku wytwarzania czy montażu. Szczególnie w ostatnich latach zauważamy intensywny rozwój tej techniki. Związane jest to ze wzrostem wymagań jakościowych w obszarze przemysłu samochodowego, lotniczego czy elektro- mechanicznego, co prowadzi do koniecznej specyfikacji wymagań wymiarowo-kształtowych i związanej z tym technologii pomiarów. Powstaje, więc, zapotrzebowanie na systemy mobilne takie właśnie jak ramiona pomiarowe (Ratajczak, 2005).

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. Kluczową rolę odgrywa tu urządzenie pomiarowe. W przypadku WRP jest to zadanie szczególnie trudne i nie zawsze jednoznaczne. Przeprowadzone badania miały na celu opracowanie metody wzorcowania i określenie obszaru maksymalnych błędów granicznych  $MPE$  (*Maximum Permissible Errors*) dla ramion

pomiarowych. Badania przeprowadzono we współpracy z firmą Hexagon Metrology Poland z wykorzystaniem WRP firmy ROMER.

### 1.1 Maszyny współrzędnościowe, a ramiona pomiarowe

Współrzędnościowe ramiona pomiarowe WRP są to systemy, które nie posiadają par kinematycznych przesuwnych, tylko obrotowe, wykraczają poza klasyfikację przyjętą w normie ISO 10360. W normie tej podano następującą definicję: „współrzędnościowa maszyna pomiarowa jest urządzeniem, którego zespoły realizujące pomiar przemieszczają się w określonych współrzędnych z tym, że minimum jeden z nich realizuje przesuw”. Ramiona pomiarowe nie spełniają, więc, tego wymogu, lecz ze względu na funkcje pomiarowe oraz obszar zastosowań powinno się je zaliczyć do systemów współrzędnościowych. Dlatego też istnieje konieczność powiązania z WMP i dążenia do opracowania norm i zaleceń odnośnie sprawdzenia ich dokładności, tak by możliwe było ich porównanie. Podobny problem występuje w przypadku wykorzystywania robotów przemysłowych do zadań pomiarów współrzędnościowych. Przykładem może być adaptacja Roboty Przemysłowego Comau Smart 3S do wykonywania zadań pomiarowych i poszukiwanie metod wzorcowania takiego systemu. Przeprowadzone badania wykazały celowość i zasadność adaptacji techniki wzorcowania charakterystycznej dla WMP do wzorcowania urządzeń nie posiadających przesuwnych par kinematycznych.

## 2. DOKŁADNOŚĆ RAMION POMIAROWYCH - TESTY PRODUCENTÓW

Przeprowadzane przez producentów badania celem ustalenia błędu granicznego ramion pomiarowych obejmują:

### A. Test pojedynczego punktu na kuli kalibracyjnej

Test ten polega na pomiarze kuli wzorcowej. Z zebranych punktów obliczana jest sfera skojarzona metodą najmniejszych kwadratów, skorygowana o promień teoretyczny końcówki.

### B. Test powtarzalności punktu

Test ten jest używany do określenia powtarzalności WRP. Stożek umieszczony jest w obszarze pomiarowym WRP, a następnie zbierane są punkty przy wychyleniu ramienia w różnych kierunkach. Z tak zebranych punktów oblicza się położenie punktu średniego i odległość każdego punktu od niego. Jako wynik oblicza się podwojoną wartość odchylenia standardowego eksperymentalnego z uzyskanych odległości.

### C. Test przestrzennej dokładności liniowej

Przestrzenna dokładność pomiaru długości jest określana przy pomocy wzorcowego liniału otworowego (dostarczanego z każdym ramieniem np. w przypadku firmy Romer), mierzonego w różnych położeniach i orientacjach w przestrzeni pomiarowej ramienia (Sokal, 2005).

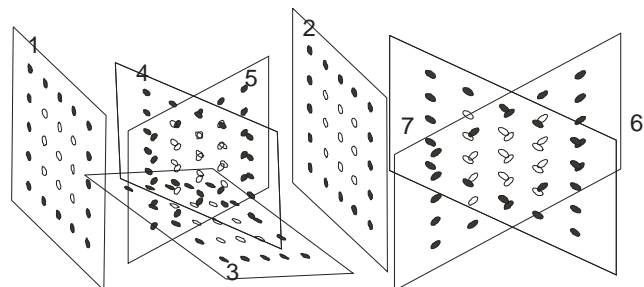
Zaprezentowane testy, nie doczekały się do tej pory powszechnie akceptowanych opracowań normalizacyjnych. Sposób przeprowadzania pomiarów oraz ich specyfikacja dotycząca danego producenta WRP uwiaryściły potrzebę przeanalizowania dostępnych normy i zaleceń dotyczących współrzędnościowych maszyn pomiarowych jako systemów o podobnym obszarze zastosowań. Postanowiono zaadaptować tu zalecenie VDI/VDE 2617-5 opracowane wspólnie przez PTB i Volkswagen AG, które pozwala na wykorzystywanie w pomiarach sprawdzających wykalibrowanej płyty kulowej lub otworowej. Wykalibrowane są tu współrzędne środków kul lub otworów. Przedmiotem zaś sprawdzenia są kombinacje długości będących odległościami środków poszczególnych otworów lub kul, przez co uzyskuje się podobny efekt jak przy wykorzystaniu wzorców końcowych. Technologia pomiarów z wykorzystaniem płyt kulowych odpowiada technice pomiarów z wykorzystaniem ramion i ich możliwością wyboru punktu styku dla możliwie różnych konfiguracji ramienia. Należy zaznaczyć, że wykorzystanie płyt otworowych granitowych do zadania oceny dokładności lokalizacji poszczególnych otworów z wykorzystaniem ramion pomiarowych podjęto już w pracy (Tyka i Góralczyk, 2006).

## 3. METODA KALIBRACJI I SPRAWDZANIA RAMION POMIAROWYCH

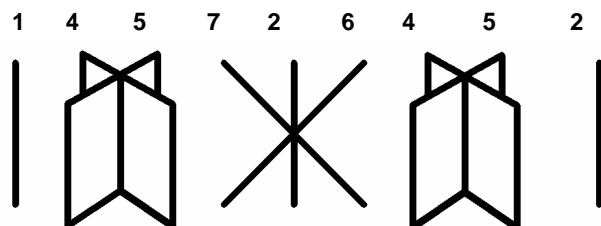
### 3.1. Koncepcja metody

Jak podano w poprzednim rozdziale, w wyniku dokonanej analizy, przyjęto pomysł procedury wzorcowania a następnie sprawdzenia WRP wykorzystującej płytkę

wzorcowe kulowej. Istotne jest, że kształt geometryczny wzorca kulowego pozwala na sprawdzenie systemów redundantnych takich jak WRP. Ponadto wzorce te są wykorzystywane zgodnie z zaleceniami VDI/VDE 2617-5 do sprawdzenia współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Pozwala to na podjęcie w dalszych badaniach zadania porównania dokładności WMP i ramion pomiarowych w ramach wspólnego testu. W pracach nad procedurą wzorcującą wykorzystano też normę ISO 10360-2 oraz ISO/TS23165:2006(E) dotyczącą wyznaczania niepewności maszyn pomiarowych. Adaptując te normy i zalecenia do specyfikacji WRP, uwzględniono też konstrukcję ramion i praktykę pomiarową w wyniku czego zaproponowano zestaw położeń wzorca pokrywający jego zakres pomiarowy. Ponadto zgodnie ze Sładek (2001), współrzędnościowe ramie pomiarowe podobnie jak, a WMP, powinny być traktowane jako jeden wspólny system składający się z części mechanicznej, systemu stykowego, oprogramowania oraz operatora. Wpływ tych elementów jest wyraźny w każdym zidentyfikowanym punkcie pomiarowym. Wyznaczenie błędu wskazania E jest oparte na porównaniu wartości wzorcowych z wartościami wskazanymi przez WRP. Przedmiotem oceny są odległości (długości) pomiędzy wyznaczonymi środkami kul. W wyniku badań ustalono, iż do wyznaczenia błędu wskazania wystarczy 16 kul, usytuowanych na obrzeżach wzorca. Uwzględniając optymalną ze względu na czas pomiarów metodykę, oraz wymogi możliwie pełnego pokrycia przestrzeni pomiarowej WRP przyjęto - zgodnie z Rys. 1a siedem położeń wzorca w różnych kierunkach w przestrzeni pomiarowej, gdzie pomiary powtarzane są trzy krotnie.



Rys. 1a. Ustawienie płyty w przestrzeni pomiarowej



Rys. 1b. Ustawienie płyty na całej długości pola pomiarowego

Rys. 1b. przedstawia sposób ułożenie płyty wzorcowej, na całej długości obszaru pomiarowego WRP. Dla pełnej weryfikacji kinematyki urządzenia układ został powtarzany przy trzech różnych zamocowaniach obracanych o  $120^{\circ}$ , przy podstawie. Ostatnie zamocowanie urządzenia jest usytuowane na poziomie o 400 mm niższym, od mierzonego elementu.

### 3.2. Kalibracja wzorca

Do badań użyto, stalowy wzorec płytowy o wymiarach 250x250 mm opracowany i zbudowany w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej na Politechnice Krakowskiej. We wzorcu zamocowano 25 kul, w pięciu rzędach po pięć w każdym rzędzie. Współrzędne środków kul zostały wyznaczone, w lokalnym układzie współrzędnych wzorca, w wyniku wzorcowania na dokładnej WMP - PMM 12106 Leitz z wykorzystaniem techniki *swing-round* (Sładek, 2001) w warunkach stabilizacji termicznej  $\pm 0.1K$ . Uzyskana niepewność wzorca wynosi:

$$U(\mathcal{E}_{cal}) = 0.88 + 0.002 * L, \quad (1)$$

gdzie L to odległość poszczególnych środków kul wzorca w [mm].

### 3.3. Błąd systemu stykowego

Błąd wskazania systemu stykowego P wyznaczono w oparciu o procedurę zgodną ISO 10360-2. Gdzie  $P = R_{max} - R_{min}$  jako odległości promieniowe od gaussowskiego elementu odniesienia. Jako element wzorcowy zaleca się wybrać kulę bądź pierścień wzorcowy ze średnicą nominalną nie mniejszą niż 10 mm i nie większą niż 50mm o określonych i potwierdzonych certyfikatem błędach kształtu F. Celem wyznaczenia błędu wskazania P przyjęto wykonanie pomiaru w 25 punktach i obliczenie metodą najmniejszych kwadratów wg Gaussa elementu najlepszego dopasowania i wyznaczenia długość promienia okręgu wyrównawczego R.

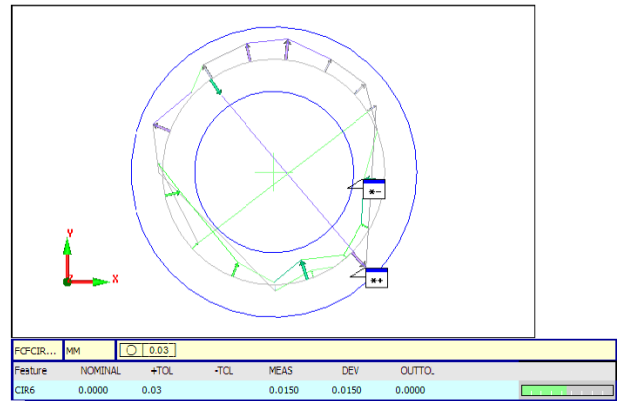
Niepewność rozszerzona wyznaczenia błędu P związana jest z charakterystyka elementu wzorcowego następującą zależnością zgodnie z ISO/TS 23165:2006(E):

$$U_g = 2 \sqrt{\left(\frac{F}{2}\right)^2 + u^2(F)} \quad (2)$$

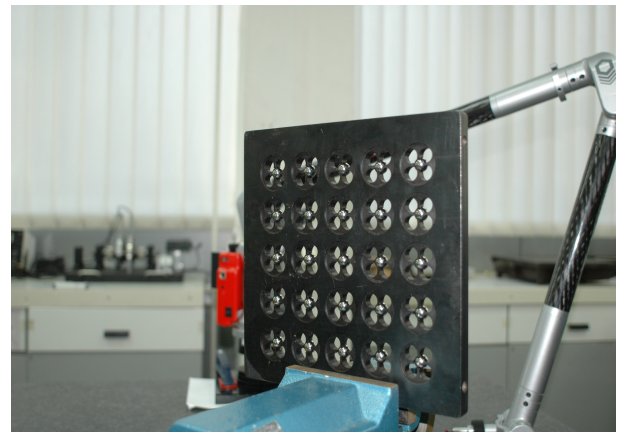
gdzie:

F- jest to błąd kształtu wzorca kulistego lub pierścieniowego,

$U(F)$  –niepewność standardowa wyznaczonego błędu kształtu wzorca kulistego.



Rys.2. Błąd wskazania elementu stykowego



Rys. 3. Płytkowy wzorec kulowy użyty do pomiarów

Określony maksymalny błąd elementu stykowego wyniósł:  $P = 15,5 \mu m$ .

W badaniach wykorzystywano sztywną końcówkę stykową o średnicy 6 mm. Podobną procedurę należy wykorzystać w przypadku stosowania głowicy elektrostykowej (np. Renishaw lub TESA).

W przypadku procedury sprawdzania opartej o potwierdzenie obszaru błędów granicznych dopuszczalnych zgodnie z ISO 10360 błąd graniczny dopuszczalny głowicy pomiarowej ramion,  $mpe_p$ , należy określić jako:

$$MPE_p = 15.5 \mu m \geq P \quad (3)$$

### 3.4. Niepewność pomiaru temperatury

Przyjęto zakres zmian temperatury w granicach osiągalnych dla dokładnie klimatyzowanego laboratorium to jest  $\pm 0,1[K]$ .

Niepewność pomiaru temperatury wzorca określono dla zmiany temperatury  $\Delta T_w$ , przy przyjętym współczynniku rozszerzalności mierzonego wzorca płytkowego  $\alpha_w$ :

$$u(\mathcal{E}_w) = \Delta T_w * \alpha_w = 0,1K * 11,5 * 10^{-6} [\mu m K^{-1}] = 0,51 [\mu m] \quad (4)$$

W przypadku, gdy korekcja temperatury przedmiotu nie zostanie przyjęta, będziemy musieli przyjąć  $\Delta T_w$ ,

określając maksymalne odchylenia temperatury przedmiotu od temperatury odniesienia 20 °C (ISO/TS 23165:2006(E)).

### 3.5. Maksymalny błąd graniczny wyznaczany dla pomiaru długości MPE

Przeprowadzone badania i analiza pozwoliły na wyznaczenie błędu wskazania E, niepewności jego wyznaczenia  $U(E)$ ,  $MPE_E$ , oraz  $MPE_P$  dla WRP o zakresie pomiarowym  $\pm 1.25[m]$ . Wartości E błędu wskazania w warunkach ustalonych tj. przy założeniu minimalizacji wpływu strategii pomiarowej i stabilizacji warunków zewnętrznych dopuszczone przez warunki techniczne lub wymagania stosowania nie przekracza pewnego obszaru, który może być wyznaczony jako obszar błędów granicznych dopuszczalnych MPE. Na osi odciętych naniesiona jest wartość wzorcowa mierzonej długości w [mm], dla której dokonywany był pomiar wzorcujący. Oś rzędnych opisuje wartości błędu wskazania E. Posuwając się wzdłuż badanej osi wyznacza się wartości błędów dla kolejnych zmierzonych długości.

Sumaryczny błąd wskazania E dla pomiaru długości przedstawia następujące równanie:

$$E = x_{wskaz} - x_{kal} \quad (5)$$

gdzie ogólnie:

$x_{wskaz}$  - wartość wielkości wskazana,  $x_{kal}$  - wartość wielkości wzorcowa

w wyniku pomiarów uzyskano wartości wskazania E i dla nich określono równanie błędów granicznych MPE

$$E = A + K/L \quad (6)$$

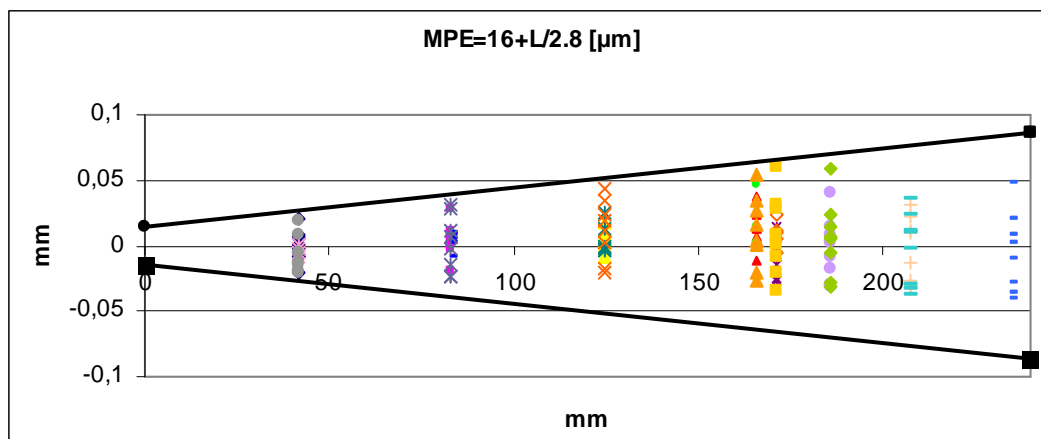
gdzie:

$A = 15.034 [\mu m]$

$K = 2.8 [\mu m]$

Do obliczenia całkowitego obszaru błędu pomiaru długości konieczne jest, więc uwzględnienie błędów wskazania w poszczególnych obszarach, wykonując pomiary w jednym zamocowaniu ramienia i przy narastających wartościach przemieszczenia ramienia można było określić całkowity obszar błędów MPE jako:

$$MPE = 16 + L/2.8 [\mu m] \quad (7)$$



Rys.4. Wybrany wykres MPE dla ramienia pomiarowego w zakresie użytego wzorca płytowego

Na wykresie zaprezentowano wybrane wyniki dla jednego z położeń płyty.

### 3.6. Procedura wyznaczania niepewności błędu wskazania $u(E)$

Procedura wyznaczenia niepewności błędu wskazania  $u(E)$  polega na obliczeniu wszystkich składowych niepewności pomiaru i jest konieczna dla wyznaczenia obszaru błędów granicznych MPE

$$u(E) = \sqrt{u^2(\varepsilon_{cal}) + u^2(\varepsilon_{\alpha}) + u^2(\varepsilon_t) + u^2(\varepsilon_{align}) + u^2(\varepsilon_{fixt})} \quad (8)$$

gdzie:

$u(\varepsilon_{cal})$  – niepewność kalibracji użytego wzorca,

$u(\varepsilon_{\alpha})$  – niepewność wyznaczenia współczynnika rozszerzalności liniowej wzorca,

$u(\varepsilon_t)$  – niepewność temperatury,

$u(\varepsilon_{align})$  – niepewność wyznaczenia układu współrzędnych,

$u(\varepsilon_{fixt})$  – niepewność mocowania przedmiotu.

**Tab.1.** Specyfikacja WRP i warunków otoczenia

WRP	Zakres pomiarowy MPE <sub>P</sub> MPE <sub>E</sub> Kompensacja temperaturowa	2025 mm 15 μm 16+L/2.8 μm brak
Wzorzec pierścieniowy	Błąd kształtu, F	(0.06± 0.1) μm
Wzorzec płytowy	Niepewność kalibracji wzorca Współczynnik rozszerzalności cieplnej	0.88+0.002*L 11,5 10 <sup>-6</sup> μm

Niepewność standardowa wzorca wynosi:

$$u_g = \sqrt{\left(\frac{0.06}{2}\right)^2 + (0.1)^2} = 0.1 \mu\text{m} \quad (9)$$

Niepewność rozszerzona:

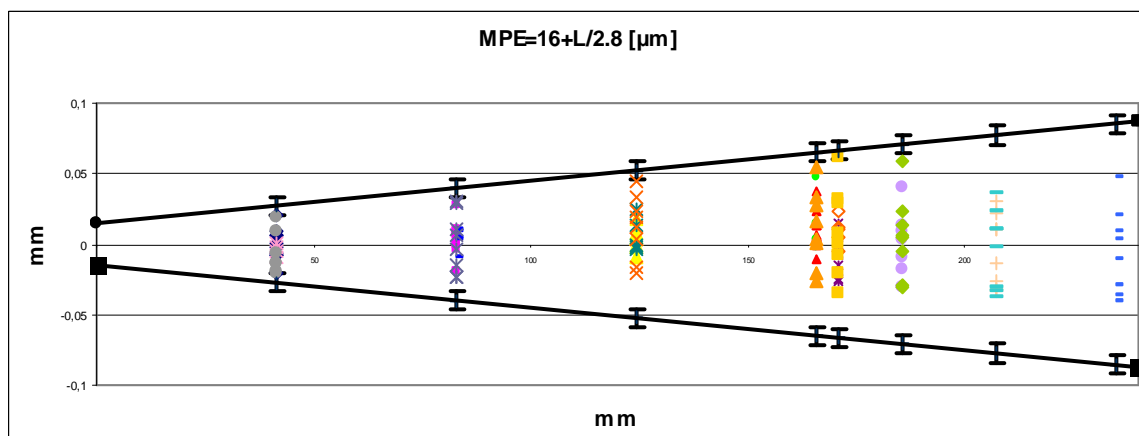
$$U_g = k \cdot u(P) = 2 \cdot 0.1 = 0.2 \mu\text{m} \quad (10)$$

Według normy ISO/TS 23165:2006(E) składniki niepewności  $u(\varepsilon_{align})$ , oraz  $u(\varepsilon_{fixt})$  należy redukować do minimum, stosując różne strategie pomiarowe. Składnik  $u(\varepsilon_{align})$  można pominać, jeśli układ współrzędnych wzorca przy jego kalibracji, był taki sam jak przy pomiarach sprawdzających. Również  $u(\varepsilon_{fixt}) = 0$  jeśli zamocowanie przy pomiarach nie było zmienione.

Poniżej w tabeli 2 zaprezentowano budżet wyznaczenia niepewności błędu wskazania  $u(E)$ .

**Tab. 2.** Budżet niepewności pomiaru WRP

L, mm	41.46	82.99	124.44	165.95	171.08	185.5	207.45	235.00
	3	2	3	6	8	6	2	2
$u(\varepsilon_{cal}), \mu\text{m}$	0.48	0.53	0.56	0.61	0.62	0.63	0.65	0.68
$u(\varepsilon_{\alpha}), \mu\text{m}$	0.004	0.008	0.012	0.017	0.017	0.019	0.02	0.023
$u(\varepsilon_{align}), \mu\text{m}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
$u(\varepsilon_{fixt}), \mu\text{m}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
$u(\varepsilon_r), \mu\text{m}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
$u(E), \mu\text{m}$	0.481	0.523	0.565	0.606	0.611	0.626	0.648	0.675
$U(E), \mu\text{m}$	0.963	1.046	1.129	1.212	1.223	1.252	1.295	1.351



**Rys. 5.** Niepewności błędu wskazania  $U(E)$

#### 4. PODSUMOWANIE

Współrzędnościowe ramiona pomiarowe (WRP) to systemy mobilnej metrologii współrzędnościowej. Podstawowymi ich zaletami to niski koszt, oraz możliwość pracy w zróżnicowanych warunkach zewnętrznych. Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje charakterystyczny dla tych urządzeń obszar pomiarowy o podwyższonej niepewności pomiarów. Dla ramienia o zakresie do  $\pm 1.25$  [m], jest to obszar o promieniu ok. 250 mm. Istnienie tego obszaru wynika z kinematyki urządzenia oraz charakterystyki pracy enkoderów, szczególnie na końcach ich zakresów pomiarowych. Zaproponowana procedura wzorcowania i sprawdzania oparta o wykorzystanie wzorców płytowych pozwala na szybkie i pewne sprawdzenie dokładności WRP.

Istotnym jest też możliwe rozwinięcie metody stosowania wzorców płytowych i ewentualnie laserowych systemów śledzących w nowej koncepcji wyznaczania dokładności współrzędnościowych systemów pomiarowych takiej jak Metoda Macierzowa (Śladek, 2001). Wyznaczony obszar błędów granicznych dopuszczalnych zarówno dla systemu stykowego  $MPE_P$  jak i pomiaru długości  $MPE_E$  pokrywa obszar stosowania ramienia. Podano też procedurę wyznaczenia niepewności wzorcowania poprzez wyznaczenie niepewności błędu wskazania  $U(E)$  uwzględniającą warunki wzorcowania: niepewność wyznaczenia temperatury, niepewność kalibracji użytych wzorców oraz niepewność systemu stykowego. Podano budżet tak obliczonej niepewności. Równanie błędów granicznych dla badanego ramienia dla tak opracowanej metodyki sformułowano jako:  $MPE_E = 16 + L/2.8$  [ $\mu\text{m}$ ] i uzależnione jest od mierzonej długości oraz ważne jest poza obszarem podwyższonej niepewności czyli powyżej promienia o średnicy 250 [mm] liczonej od punktu zamocowania WRP. Dla porównania  $MPE_E$ , wyznaczone przez producenta jest wyższe i wynosi  $\pm 0.035$  [ $\mu\text{m}$ ] ponadto nie uwzględnia obszaru podwyższonej niepewności.

Aby w pełni określić składowe niepewności wzorcowania ramion, uzależnione od parametrów tego urządzenia niezbędne są dalsze prace takie jak:

- powiązanie podobszarów kontrolnych ograniczonych wymiarami płyty wzorcowej, tak by możliwe było określenie równania  $MPE$  dla całego obszaru kontrolnego zależnie od mierzonej długości,
- zweryfikowanie kinematyki ramion pomiarowych
- obliczenie zadania prostego i odwrotnego kinematyki w trakcie pomiarów z wykorzystaniem laserowych systemów nadążnych.
- budowa modelu wyznaczania dokładności pomiarów realizowanych przy wykorzystaniu WRP.

Do realizacji trzech ostatnich zadań, konieczne jest ustalenie zależności położenia punktu końcowego od położenia punktów pośrednich ramienia. Aby to było możliwe, konieczne jest zdaniem autorów, zastosowanie notacji Denavita-Hartenberga, którą wprowadzono do robotyki w celu uproszczenia opisu kinematyki robota. Notacja ta może być z powodzeniem zastosowana dla ramion pomiarowych pozwalając za pomocą macierzy przedstawić algorytm oceny dokładności przemieszczenia.

#### LITERATURA

1. **Śladek J.** (2001), Ocena i modelowanie dokładności maszyn oraz pomiarów współrzędnościowych.- Zeszyty naukowe seria Mechanika nr 87 - Politechnika Krakowska.
2. **Ratajczak E.** (2005), Współrzędnościowa Technika Pomiarowa, Wyd Polit. Warszawskiej Warszawa.
3. **Tyka A, Góralczyk A.** (2006), Próba wykorzystania dwuwymiarowego wzorca płytowego z stożkowymi elementami pomiarowymi do kontroli dokładności ramion pomiarowych, VII-th International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Zeszyty Naukowe ATH Bielsko-Biała.
4. **Ostrowska K.** (2006), Metody oceny dokładności hybrydowych maszyn pomiarowych i ich zastosowanie, Conference „Automation in Production Planning and Manufacturing“, Zielina.
5. **Sokal G.** (2005), Metoda podwyższenia dokładności pomiarów współrzędnościowych dokonywanych przez przemysłowe, Praca doktorska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków.

#### NORMY I ZALECENIA

1. **ISO 10360** – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM)
2. **ISO/TS 23165:2006(E)** – Geometrical product specifications (GPS) — Guidelines for the evaluation of coordinate measuring machine (CMM) test uncertainty
3. **VDI/VDE 2617** – Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kengrößen und deren Prüfung VDI-

#### CALIBRATION OF COORDINATE MEASURING ARMS

**Abstract:** When the frequency of assortments changes is very high, the increase of requirements concerning the quality of production creates good conditions for the application of universal measuring tools, such as coordinate systems. The application of systems with rotary kinetic couples is caused by the necessity to measure places which are hard to access by classical measuring machines. Industrial robots adjusted to measuring tasks, and coordinate measuring arms in particular (CMA), are one of the most commonly applied systems. Planning on the application of these type of devices, their accuracy should be analyzed in the conditions of testing length measurement. This article proposes the application of norms and offers recommendations concerning the control and calibration of coordinate measuring machines for CMA calibration tasks. The conducted calibration WRP with use of a ball plate was the starting point for describing the space of Maximum Permissible Errors (MPE) and the uncertainty of assignment of the indication error. Keywords: calibration,  $MPE_P$ ,  $MPE_E$ , 3D measuring arm, measurement uncertainty