

Nowe rodzaje współrzędnościowych maszyn pomiarowych i nowe oznaczenia ich parametrów

Część I: Parametry charakteryzujące dokładność

New types of coordinate measuring machines and new indications of their parameters
Part I: Parameters characterizing accuracy

EUGENIUSZ RATAJCZYK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.4.50>

Zdefiniowano główne parametry charakteryzujące współrzędnościowe maszyny pomiarowe pod względem dokładności. Parametry te zilustrowano w odniesieniu do przykładowej maszyny pomiarowej Prismo produkcji firmy Carl Zeiss.

SŁOWA KLUCZOWE: współrzędnościowe maszyny pomiarowe, parametry charakteryzujące dokładność

The main parameters characterizing the accuracy of coordinate measuring machines were defined. These parameters were illustrated by reference to an exemplary measuring machine Prismo by Carl Zeiss.

KEYWORDS: coordinate measuring machines, parameters characterizing accuracy

W części I artykułu zostaną zaprezentowane nowe rodzaje parametrów charakteryzujących dokładność, odniesione – jako przykład – do współrzędnościowej maszyny pomiarowej Prismo firmy Carl Zeiss. Część II będzie poświęcona maszynom o konstrukcji portalowej, natomiast część III – maszynom o konstrukcji wspornikowej.

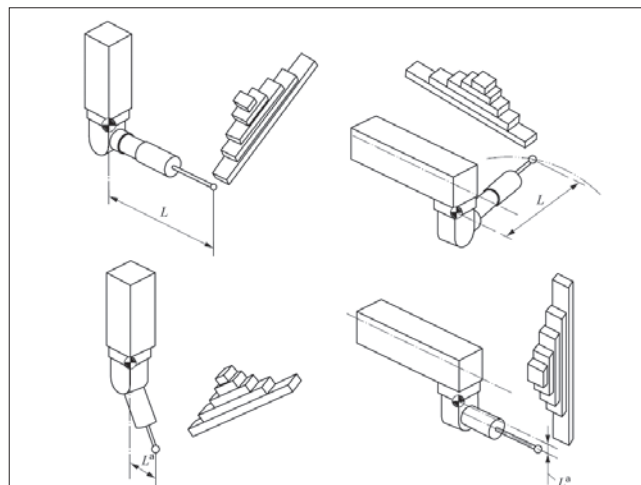
Trzecia edycja normy ISO 10360-2 z 2010 r. [1] wprowadziła nowe symbole parametrów charakteryzujących dokładność maszyny, uwzględniając przesunięcie osi końcówki pomiarowej o wymiar L (rozumiany jako odległość osi końcówki pomiarowej od osi pinoli, mierzona w linii prostopadłej do osi pinoli). Obowiązują następujące oznaczenia (symbole):

- E_L – błąd pomiaru długości,
- R_0 – rozstęp powtarzalności błędu pomiaru długości,
- $E_{L,MPE}$ – błąd graniczny dopuszczalny pomiaru długości,
- $R_{0,MPL}$ – granica dopuszczalna maksymalna rozstępu powtarzalności.

Przez E_L rozumie się błąd wskazania podczas pomiaru wzorcowanej długości z użyciem CMM z offsetem końcówki trzpienia pomiarowego względem osi pinoli wynoszącym L (rys. 1), z zastosowaniem jednego punktu próbkowania (lub jego odpowiednika) na każdym końcu wyworcowanej długości badanej.

R_0 to rozstęp (największa wartość minus najmniejsza) z trzech powtórzonych pomiarów długości wykonanych na CMM z offsetem końcówki trzpienia pomiarowego względem osi pinoli wynoszącym zero. $E_{L,MPE}$ to największa wartość błędu pomiaru długości E_L dozwolona przez specyfikację, a $R_{0,MPL}$ oznacza skrajną wartość rozstępu powtarzalności błędu pomiaru długości R_0 dozwoloną przez specyfikację. Wartości błędów E_L , $E_{L,MPE}$, R_0 i $R_{0,MPL}$ podawane są w mikrometrach, a L – w milimetrach.

W przypadku głowic pomiarowych obowiązuje norma PN-EN ISO 10360-5:2010, w której wyróżniono parametry:



Rys. 1. Przykłady ilustrujące położenia (offset) końcówki trzpienia pomiarowego na długości L względem osi pinoli dla zespołu głowicy obrotowo-uchylnej

- P_{FTj} – błąd (pomiaru) kształtu zespołu wielotrzeniowego,
- P_{STj} – błąd wymiaru zespołu wielotrzeniowego,
- P_{LTj} – wartość położenia zespołu wielotrzeniowego,
- P_{FTU} – błąd kształtu pojedynczego trzpienia pomiarowego,
- P_{STU} – błąd wymiaru pojedynczego trzpienia pomiarowego,
- $P_{FTj,MPE}$ – błąd graniczny dopuszczalny kształtu zespołu wielotrzeniowego,
- $P_{STj,MPE}$ – błąd graniczny dopuszczalny wymiaru zespołu wielotrzeniowego,
- $P_{LTj,MPL}$ – maksymalna granica dopuszczalna wartości położenia zespołu wielotrzeniowego,
- $P_{FTU,MPE}$ – błąd graniczny dopuszczalny kształtu pojedynczego trzpienia pomiarowego.

Błąd (pomiaru) kształtu zespołu wielotrzeniowego P_{FTj} to błąd wskazania, w którym rozstęp odległości promieniowych według kryterium Gaussa może być wyznaczony przez dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów do punktów zmierzonych na kuli badawczej (za pomocą pięciu różnych trzpieni pomiarowych, na jednej kuli badawczej usytuowanej w dowolnym miejscu przestrzeni pomiarowej CMM, w trybie próbkowania punktowego). Litera P oznacza, że błąd jest związany z działaniem zespołu głowicy pomiarowej, a indeks dolny F – że jest to błąd kształtu. Indeks dolny T świadczy, że zespół głowicy pomiarowej jest zgodny z charakterem stykowym i umożliwia jednoznaczne identyfikowanie alternatywnego systemu próbkowania.

Są cztery rodzaje błędów kształtu systemu wielotrzeniowego w zależności od różnych systemów (zespołów)

* Prof. dr inż. Eugeniusz Ratajczyk (erat33@interia.pl) – Wydział Inżynierii i Zarządzania Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie

głowicy pomiarowej i metod działania: $j=E$ (zespół głowicy pomiarowej obrotowo-uchylnej wykorzystujący kwalifikację doświadczalną), $j=I$ (zespół głowicy pomiarowej obrotowo-uchylnej wykorzystujący kwalifikację interpolowaną), $j=M$ (nieruchomy zespół głowicy pomiarowej, tj. z ustalonym zespołem wielotrzeniowym), $j=N$ (ustalony, nieruchomy, zespół wielogłowicowy).

P_{STj} – błąd wymiaru zespołu wielotrzeniowego – jest to błąd wskazań, w którym średnica kuli badawczej może być określona przez dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów do punktów wyznaczonych z pomiarów wykonywanych pięcioma różnymi trzpieniami pomiarowymi na jednej kuli badawczej ustawionej w dowolnym miejscu przestrzeni pomiarowej CMM w trybie próbkowania punktowego. Indeks dolny S oznacza, że jest to błąd wymiaru.

P_{LTj} – wartość położenia zespołu wielotrzeniowego – jest to wartość maksymalna zakresów współrzędnych X , Y i Z , w których położenie kuli badawczej może być określone przez dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów do punktów wyznaczonych z pomiarów wykonywanych pięcioma różnymi trzpieniami pomiarowymi na jednej kuli badawczej ustawionej w dowolnym miejscu przestrzeni pomiarowej CMM w trybie próbkowania punktowego. Indeks dolny L oznacza, że jest to wartość położenia (lokalizacji). Wszystkie wartości są bezwzględne.

P_{FTU} – błąd kształtu pojedynczego trzpienia pomiarowego – jest to błąd wskazania, w którym rozstęp promieni może być określony przez dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów do punktów zmierzonych na kuli badawczej, wyznaczonych z pomiarów wykonywanych pojedynczym trzpieniem pomiarowym na jednej kuli badawczej usytuowanej w dowolnym miejscu przestrzeni pomiarowej CMM w trybie próbkowania punktowego. Litera P oznacza, że błąd jest związany głównie z działaniem zespołu głowicy pomiarowej. Indeks U wskazuje na użycie pojedynczego trzpienia pomiarowego. Parametr P_{FTU} odpowiada parametrowi P w ISO 10360-2:2001.

P_{STU} – błąd wymiaru pojedynczego trzpienia pomiarowego – jest to błąd wskazań różnicy między średnicą dopasowaną metodą najmniejszych kwadratów do punktów pomiarowych na kuli badawczej a średnicą wzorcową, z pomiarów wykonywanych na CMM z pojedynczym trzpieniem pomiarowym, w trybie próbkowania punktowego; punkty są zebrane na kuli badawczej znajdującej się w dowolnym miejscu przestrzeni pomiarowej maszyny. Litera P oznacza, że błąd związany jest głównie z działaniem zespołu głowicy pomiarowej. Indeks dolny U wskazuje na użycie pojedynczego trzpienia. Indeks dolny S świadczy, że jest to błąd wymiaru.

$P_{FTj,MPE}$ – błąd graniczny dopuszczalny kształtu zespołu wielotrzeniowego – jest to wartość skrajna błędu kształtu zespołu wielotrzeniowego P_{FTj} , dopuszczalna dla CMM przez specyfikacje, ustalenia itp. Wartość błędu granicznego dopuszczalnego kształtu zespołu wielotrzeniowego $P_{FTj,MPE}$ może być wyrażona w jednej z następujących postaci:

- $P_{FTj,MPE} = \text{minimum } (A+L_p/K) i B,$
- $P_{FTj,MPE} = (A+L_p/K),$
- $P_{FTj,MPE} = B,$

gdzie: A – stała dodatnia, wyrażona w mikrometrach i podawana przez producenta; K – bezwymiarowa stała dodatnia podawana przez producenta; L_p – odległość w 3D między środkami kuli wzorcowej i kuli badawczej, w milimetrach; B – błąd graniczny dopuszczalny $P_{FTj,MPE}$, wyrażony w mikrometrach i ustalony przez producenta.

$P_{STj,MPE}$ – błąd graniczny dopuszczalny wymiaru zespołu wielotrzeniowego – jest to wartość skrajna błędu

wymiaru zespołu wielotrzeniowego P_{STj} dopuszczalna dla CMM przez specyfikacje, ustalenia itp. Wartość błędu granicznego dopuszczalnego wymiaru zespołu wielotrzeniowego $P_{STj,MPE}$ może być wyrażona w jednej z trzech następujących postaci:

- $P_{STj,MPE} = \text{minimum } (A+L_p/K) i B,$
- $P_{STj,MPE} = (A+L_p/K),$
- $P_{STj,MPE} = B,$

gdzie: B jest błędem granicznym dopuszczalnym $P_{STj,MPE}$, wyrażonym w mikrometrach, ustalonym przez producenta.

$P_{STj,MPE}$ może być określony przy długości offsetu końcówki głowicy pomiarowej lub przy opisie układu trzech trzpieni pomiarowych.

$P_{LTj,MPL}$ – granica dopuszczalna maksymalna wartości położenia zespołu wielotrzeniowego – jest to wartość skrajna położenia zespołu wielotrzeniowego P_{LTj} , dopuszczalna dla CMM przez specyfikacje, ustalenia itp. Wartość błędu granicznego dopuszczalnego wymiaru zespołu wielotrzeniowego $P_{LTj,MPL}$ może być wyrażona w jednej z następujących postaci:

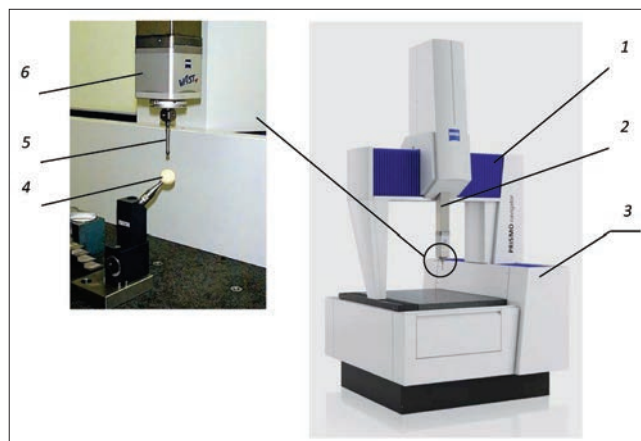
- $P_{LTj,MPL} = \text{minimum } (A+L_p/K) i B,$
- $P_{LTj,MPL} = (A+L_p/K),$
- $P_{LTj,MPL} = B.$

Specyfikację granicy dopuszczalnej maksymalnej MPL – w przeciwieństwie do błędu granicznego dopuszczalnego MPE – stosuje się, gdy pomiary badawcze nie określają błędów, dlatego badanie specyfikacji MPL nie wymaga użycia wyworcowanych artefaktów.

$P_{FTU,MPE}$ – błąd graniczny dopuszczalny kształtu pojedynczego trzpienia pomiarowego – jest to wartość skrajna błędu kształtu pojedynczego trzpienia pomiarowego P_{FTU} dopuszczalna dla CMM przez specyfikacje, ustalenia itp. $P_{FTU,MPE}$ może być określony przy długości offsetu głowicy pomiarowej–końcówka lub przez opis układu trzpieni pomiarowych. $P_{FTU,MPE}$ jest identyczny z MPE_P według normy ISO 10360-2:2003.

Przykład zastosowania wymienionych parametrów i ich wartości zostały zilustrowane w tablicy w odniesieniu do współrzędnościowej maszyny pomiarowej Prismo firmy Carl Zeiss [2, 3].

Współrzędnościowa maszyna pomiarowa Prismo jest przeznaczona do pomiaru wymiarów oraz odchyłek geometrycznych dokładnie wykonanych części maszyn. Jest dostępna w czterech opcjach wymiarowych: Zeiss Prismo 5 + 7 X = 700 mm i Zeiss Prismo 5 + 7 X = 900 mm, Zeiss Prismo 10 X = 1200 mm oraz Zeiss Prismo 10 X = 1600 mm. Ponadto występuje opcja Zeiss Prismo Ultra i Zeiss Prismo Navigator (rys. 2). W tablicy podano



Rys. 2. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa Zeiss Prismo Navigator: 1 – portal, 2 – pinola, 3 – boczny napęd portalu, 4 – kula wzorcowa, 5 – trzpień pomiarowy, 6 – głowica pomiarowa Vast [3]

TABLICA. Ważniejsze parametry maszyn Zeiss Prismo Ultra Sensor *

Parametr	Oznaczenie parametru	Maszyna Prismo 5 + 7 X = 700 mm, X = 900 mm	Maszyna Prismo 10 X = 1200 mm	Maszyna Prismo 10 X = 1600 mm
Błąd graniczny dopuszczalny pomiaru długości według ISO 10360-2:2010 (dla 20±22°C)	$E_{L0,MPE}$, μm	0,5 + L/500	1,2 + L/500	1,9 + L/400
	$E_{L150,MPE}$, μm	0,8 + L/500	1,6 + L/500	2,5 + L/400
Maksymalna dopuszczalna granica rozstępu powtarzalności	$R_{0,MPL}$, μm	0,4	0,7	0,8
Błąd pomiaru skaningowego według ISO 10360-4:2002	THP , μm	0,9	1,1	1,6
	τ , czas, s	40	40	40
Dopuszczalny błąd graniczny kształtu pojedynczego trzpienia pomiarowego według ISO 10360-5:2010	$P_{FTU,MPE}$, μm	0,5	0,8	1,1
Dopuszczalny błąd graniczny kształtu zespołu wielotrzipieniowego według ISO 10360-5:2010	$P_{FTM,MPE}$, μm	1,9	2,2	2,3
Dopuszczalny błąd graniczny wymiaru zespołu wielotrzipieniowego według ISO 10360-5:2010	$P_{STM,MPE}$, μm	0,6	0,9	1,1
Maksymalna dopuszczalna granica wartości położenia zespołu wielotrzipieniowego według ISO 10360-5:2010	$P_{LTM,MPL}$, μm	1,2	1,5	1,7

* Dane odnoszą się do zastosowanego trzpienia pomiarowego o długości 60 mm i średnicy końcówki pomiarowej 8 mm.

wartości ważniejszych parametrów charakteryzujących dokładność maszyn Prismo Ultra Sensor w odniesieniu do głowicy Vast Gold, o długości trzpienia pomiarowego 60 mm i końcówce o średnicy 8 mm, chociaż możliwe jest stosowanie głowicy Vast Gold o maksymalnej długości trzpienia pomiarowego nawet 800 mm i przy minimalnej średnicy końcówki wynoszącej 0,3 mm.

Maszyna jest wyposażona w serwonapęd o wysokiej dynamice przyspieszeń. W każdej osi zastosowano elektroniczną kontrolę napędu, a w osiach X i Z – dodatkowo ograniczniki siły przesuwu. Maszyna jest sterowana w trzech osiach wektorowo za pomocą mikroprocesora.

Prędkość pomiarowa wymienionych maszyn Prismo zawiera się w przedziale 0÷70 mm/s, natomiast w trybie CNC – prędkość osiowa wynosi maksymalnie 300 mm/s, wektorowa – maksymalnie 520 mm/s, a z opcją Navigator – maksymalnie 350 mm/s. Przyspieszenia osiowe dla maszyn Prismo 5 + 7 i Prismo 10 osiągają wartość maksymalnie 1,2 m/s², maszyn Prismo 10 X = 1600 – maksymalnie 0,8 m/s², a Prismo Ultra – 0,38 m/s². Wektorowe przyspieszenia wynoszą odpowiednio dla wymienionych maszyn maksymalnie: 1,87; 1,87; 1,38; a dla wersji Ultra – 0,67 m/s².

Przedstawione w tabelicy wartości błędów maksymalnych zostaną utrzymane na wymienionym poziomie, pod warunkiem zachowania gradientów temperatury (*thermal fluctuation*), które wynoszą np. dla maszyny Prismo Navigator 5 + 7: 0,8 K/h, 1,8 K/dzień, a gradient przestrzenny (*thermal gradient spacial*) osiągają wartość: 0,8 K/m. Największe wartości występują dla maszyny Prismo 10 X = 1200 mm i 1600 mm i wynoszą 2 K/h, 5 K/dzień i 1 K/m [4–6].

Rozdzielczość sygnału układów pomiarowych wynosi 0,2 μm dla maszyn Prismo Navigator i 0,02 μm dla maszyn Prismo Ultra. Zasilanie elektryczne to 100/240 V ($\pm 10\%$); całkowity pobór mocy wynosi maksymalnie 2500 V·A przy typowym bieżącym poborze 380 W.

Ciśnienie zasilania pneumatycznego wynosi 6 bar, maksymalnie 8 bar przy konsumpcji ok. 50 N·l/min. Wymagane jest wstępne oczyszczanie powietrza, którego jakość określono w ISO 8573, część 1: klasa 4. Dopuszczalne warunki otoczenia to wilgotność względna 40÷70%.

Portal przesuwu się na ośmiu pneumatycznych (aerostatycznych) łożyskach – po cztery w każdej osi. Specjalne

ułożenie łożysk pneumatycznych wokół belki prowadzącej zapobiega skręcaniu się portalu maszyny. Napęd zapewniający przesuw odbywa się poprzez układ gumowych pasów, które napędza silnik za pomocą gumowej rolki.

W granitowym stole pomiarowym znajduje się 30 otworów rozmieszczonych co 200 mm. W otworach tych umieszczono nagwintowane tuleje M12 służące do mocowania uchwytów przytrzymujących mierzone przedmioty.

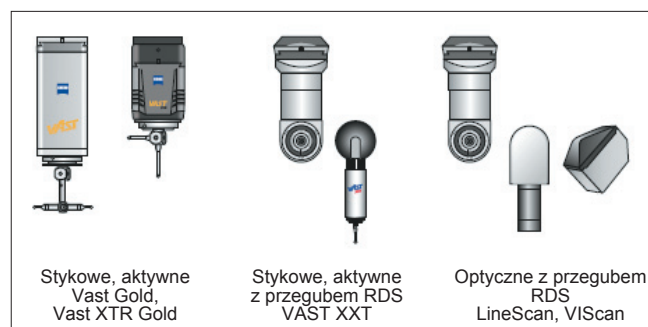
Konstrukcja maszyny zapewnia tłumienie drgań przez zastosowane potrójne układy obejmujące tłumienie elastometryczne, sprężyste i typu wiskozowego. Ochronna obudowa zabezpiecza prowadnice i linały pomiarowe przed kurzem i uszkodzeniami, a także zmniejsza wpływ temperatury na linały i układy przesuwne.

W maszynie zastosowano optoelektroniczne wzorce długości typu inkrementalnego działające w świetle odbitym. Linały zbudowano z Zeroduru o współczynniku rozszerzalności liniowej wynoszącym $0 \pm 0,05 \mu\text{m}/\text{Km}$ dla $0 \pm 50^\circ\text{C}$. Stała pól linałów inkrementalnych wynosi 10 μm , a dzięki interpolacji uzyskano na wyjściu rozdzielczość 0,2 μm . Na osi Y zastosowano dwa układy pomiarowe umieszczone po bokach w celu wyeliminowania błędów przesuwów wynikających z bocznego napędu portalu. Wyniki wskazań odczytanych z obu linałów na osi Y są uśredniane. Obecnie montuje się jeden układ pomiarowy od strony przeciwległej do napędu, a błędy wynikające z bocznego napędu kompensuje się komputerowo.

Maszyny Prismo mogą być wyposażane w głowice pomiarowe (rys. 3): do aktywnego skaningu Vast Gold i Vast XTR gold, do pasywnego skaningu Vast XXT z głowicą obrotowo-uchyłną RDS oraz dwie głowice optyczne VIScan i LineScan z głowicą obrotowo-uchyłną RDS.

Głowicę Vast Gold można zaopatrzyć w różny zestaw trzpieni pomiarowych w zależności od ukształtowania mierzonej części. Najczęściej stosowana jest tzw. konfiguracja gwiazdzista, zwana też gwiazdą.

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe Prismo wyposażone są w tzw. ramowy magazynek trzpieni i głowic pomiarowych (np. model MT – rys. 4). Magazynek ten ma cztery gniazda i służy do przechowywania trzpieni i głowic pomiarowych stosowanych w trybie pracy CNC. Magazynek nie jest niezbędny, ale pomaga skrócić czas pomiaru CNC. Możliwa jest manualna zmiana końcówek. Na rys. 4 widoczny jest z prawej strony zamontowany dodatkowy magazynek do głowic pomiarowych.



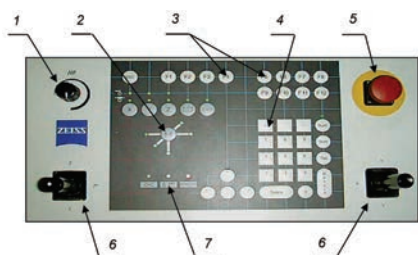
Rys. 3. Głowice pomiarowe do zastosowania w maszynach Prismo



Rys. 4. Ramowy magazynek głowic i trzpień pomiarowych (końcówek): 1 – jedna z głowic pomiarowych, 2 – trzpień pomiarowy, 3 – talerzyk mocujący, 4 – gniazdo, 5 – rama do mocowania gniazda

Magazynek jest mocowany na sztywno w dowolnym miejscu stołu pomiarowego po uprzednim zdefiniowaniu położenia gniazda magazynka na stole pomiarowym maszyny.

Firma Carl Zeiss do obsługi maszyn współrzędnościowych proponuje kilka pulpitów sterujących. Do obsługi maszyny Prismo przewidziano standardowy pulpit sterujący „niebieski” (rys. 5).



Rys. 5. Pulpit sterujący: 1 – pokrętło do regulacji prędkości przesuwu pinoli; 2 – przycisk wyboru trzpień pomiarowych; 3 – przyciski funkcyjne od F1 do F12; 4 – klawiatura numeryczna do wprowadzania danych; 5 – wyłącznik bezpieczeństwa; 6 – dwa drążki sterujące (joysticki), które służą do manualnego sterowania ruchami zespołów przesuwnych maszyny w trzech osiach; 7 – kontrolki informujące o statusie maszyny (w górnej części pulpitu znajdują się kolejne kontrolki)

Jako zestaw cyfrowego przetwarzania danych pomiarowych przewidziano komputer typu PC firmy Hewlett-Packard – Workstation x2100 wraz z osprzętem. Minimalne wymagania dla tej konfiguracji wynikające z zastosowanego oprogramowania Calypso firmy Carl Zeiss podane przez producenta to: mikroprocesor 200 MHz, pamięć 64 MB RAM, dysk twardy 2,5 GB, stacja dysków 1,44 MB, stacja CD ROM, karta graficzna NVIDIA Quadro, monitor 19 cali, drukarka atramentowa.

W praktyce firma Carl Zeiss wyposaża maszynę w następujące jednostki:

- minimalna stacja: minimalna konfiguracja: CPU Intel Core i3-4150 3,3 GHz 3 MB, RAM 8 GB (2 × 4 GB0 DDR3 1600 MHz non EEC), grafika NIVIDA NVS 310, 2 × LAN 10/100, nagrywarka DVD, Windows 7;
- stacja CAD: minimalna konfiguracja: CPU Intel Xeon E3-1226 3,3 GHz, 8 MB, dysk twardy 1 × 250 GB SSD + 1 TB SATA 7,2k, RAM 16 GB (2 × 8 GB) DDR3 1600 MHz non EEC, grafika NIVIDA Quadro K2000, 2 GB, 2 × LAN 10/100, nagrywarka DVD.

LITERATURA

1. PN-EN ISO 10360-2:2010: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 2: CMM stosowane do pomiaru wymiarów.
2. Ratajczyk E., Woźniak A. „Współrzędnościowe systemy pomiarowe”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
3. Carl Zeiss: www.zeiss.pl/metrologia/produkty/systemy/portadowe-maszyny-pomiarowe.html.
4. Śladek J. „Dokładność pomiarów współrzędnościowych”. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2011.
5. Jakubiec W., Malinowski J. „Metrologia wielkości geometrycznych”. Warszawa: WNT, 2004.
6. Humienny Z., Berta M. „Wizualizacja strategii pomiarowych wykorzystywanych do oceny odchyłek geometrycznych na współrzędnościowych maszynach pomiarowych”. *Mechanik*. 11 (2014): s. 918–922. ■