

# Wnioski z wdrożeń oprogramowania EMU w przemyśle

Władysław Jakubiec\*, Wojciech Płowucha\*, Marcin Starczak\*, Jarosław Wieczorek\*\*, Jarosław Szymanek\*\*\*

\*Laboratorium Metrologii, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

\*\*Fiat Powertrain Polska Sp. z o.o.

\*\*\*„ANGA” Uszczelnienia Mechaniczne Sp. z o.o.

**Streszczenie:** Oprogramowanie EMU do wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych opracowano w Laboratorium Metrologii ATH w ramach projektu badawczo-rozwojowego. Podstawy teoretyczne, na podstawie których powstało oprogramowanie, są opisane we wcześniejszych publikacjach. Oprogramowanie jest bardzo łatwe w użyciu. Parametry konstrukcyjne maszyny oraz dane zawierające informacje o błędach maszyny są wprowadzane przez dostawcę oprogramowania w momencie zakupu licencji. Dane dotyczące błędów maszyny są uaktualniane przez dostawcę po każdym kolejnym wzorcowaniu. Użytkownik oprogramowania tworzy własną bazę używanych trzpieni pomiarowych oraz bazy mierzonych przedmiotów, a w ich obrębie bazy charakterystyk. Najprostszym sposobem przygotowania danych dla wybranej charakterystyki, a równocześnie dokumentowania wyników szacowania niepewności pomiaru, jest następujące postępowanie: wybór modelu, wybór orientacji modelu zgodnie z orientacją mierzonego przedmiotu, wskazanie punktów charakterystycznych na modelu CAD mierzonego przedmiotu, wyznaczenie współrzędnych punktów charakterystycznych w układzie współrzędnych przedmiotu, wyznaczenie współrzędnych globalnych dla początku układu współrzędnych przedmiotu i wykonanie translacji oraz ewentualnie rotacji układu współrzędnych przedmiotu do układu współrzędnych maszyny, wypełnienie odpowiednich pól okna dialogowego. Szczególną zaletą oprogramowania jest to, że kolejne przedmioty i kolejne charakterystyki, dla których wyznacza się niepewność pomiaru, zapisywane są w bazie danych i powtórzenie obliczeń niepewności dla pomiarów wykonanych na danej maszynie, po kolejnych wzorcowaniach maszyny, jest inicjowane naciśnięciem jednego przycisku w menu.

**Słowa kluczowe:** niepewność pomiaru, współrzędnościowa technika pomiarowa, tolerancje geometryczne

## Wprowadzenie

Obecnie dobrze znane i powszechnie akceptowane są dwie metody wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych: metoda z użyciem wykalibrowanych przedmiotów wzorcowych oraz metoda symulacyjna. W 2004 r. została opublikowana specyfikacja techniczna ISO/TS 15530-3 [1], dotycząca użycia kalibrowanych przedmiotów wzorcowych, a w 2008 r. ISO/TS 15530-4 [2], dotycząca techniki symulacyjnej.

Szacowanie niepewności pomiaru, z użyciem wykalibrowanego przedmiotu wzorcowego, należy do metodycznie najprostszych i bardzo skutecznych metod wykorzystujących eksperyment. W tym podejściu część eksperymentalna pole-

ga na wielokrotnym pomiarze wykalibrowanego przedmiotu wzorcowego (artefaktu), o takiej samej lub zbliżonej postaci geometrycznej i wymiarach. W tej metodzie wyznaczania niepewności pomiaru znaczna liczba składowych niepewności jest szacowana łącznie metodą typu A. Dotyczy to w szczególności takich czynników, jak błędy geometryczne, temperatura i dryft CMM, temperatura przedmiotu (w eksperymencie powinien być włączony pełny efekt zmian w warunkach środowiskowych), błędy systematyczne systemu głowicy pomiarowej, powtarzalność CMM, rozdzielczość układów pomiarowych CMM, gradienty temperatury CMM i systemu głowicy pomiarowej, błędy przypadkowe systemu głowicy pomiarowej, niepewność wprowadzana w czasie zmiany systemu trzpieni pomiarowych, błędy spowodowane wymianą i mocowaniem przedmiotu, czy błędy powodowane zanieczyszczeniami. Metoda B stosowana jest do uwzględnienia niepewności wzorcowania przedmiotu wzorcowego. Występujące często różnice między przedmiotem a przedmiotem wzorcowym w zakresie chropowatości powierzchni, odchyłek kształtu, współczynnika rozszerzalności, sprężystości czy twardości można uwzględnić w niepewności pomiaru metodą A lub B.

Istnieje kilka sposobów przygotowania przedmiotu wzorcowego. Pierwszym, najprostszym sposobem jest wykorzystanie egzemplarza produkowanego wyrobu i jego wykalibrowanie na dokładnej maszynie, z zastosowaniem odpowiedniej strategii pomiaru. Wadą tego rozwiązania, jest nieznaną lub małą stabilność wymiarowa, nieznaną lub dużą (jak w przypadku stopów aluminium) współczynnik rozszerzalności cieplnej, czy znaczne odchyłki kształtu i chropowatość powierzchni.

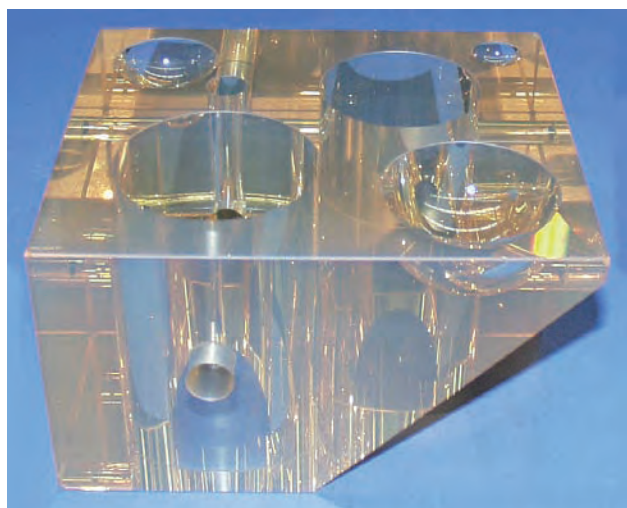
Drugi sposób polega na wykonaniu przedmiotu wzorcowego z materiału zapewniającego wyższą dokładność i stabilność wymiarową, przy czym na etapie wykonania zwraca się uwagę, by ważne powierzchnie cechowały małe odchyłki kształtu i niska chropowatość powierzchni. W takim przypadku przedmiot wzorcowy ma zwykle postać uproszczoną w stosunku do oryginału – przy jego użyciu niepewność pomiaru wyznacza się tylko dla najważniejszych charakterystyk. Jednak właśnie dostępność przedmiotów wzorcowych, o wystarczającej dokładności i stabilności wymiarowej, rozsądnej cenie i zdolności do wzorcowania z niską niepewnością, stanowi poważne ograniczenie tej metody.

Trzecią możliwością jest wykorzystanie do analizy niepewności pomiaru powszechnie dostępnych (uniwersalnych) wzorców, takich jak płytki, pierścienie, trzpienie czy kule wzorcowe, płaskie szkło interferencyjne, kątownik walcowy itp. Niekiedy z takich przedmiotów buduje się pełne zestawy, jak np. KMG Check opracowany przez C. Zeiss 3D Metrology Servi-

ces. Płytki wzorcowe w omawianym kontekście rzadko są przydatne, bowiem rzadko spotyka się części maszyn, w których występuje ważny wymiar w postaci odległości dwóch, na dodatek niewielkich, płaszczyzn. Pierścienie, trzpienie i (znacznie rzadziej) kule wzorcowe są dobrym artefaktem do wykonania badań niepewności pomiaru ale tylko średnicy (i ewentualnie odchyłek kształtu) wałka, otworu czy kuli. Te same wady dotyczą wspomnianego zestawu umożliwiającego wyznaczenie niepewności dla niewielkiej liczby i niezbyt ciekawych charakterystyk [3]. Znacznie ciekawsze jest zastosowanie kątownika walcowego. Przy jego pomocy można wykonać badania niepewności pomiaru znacznej liczby różnorodnych charakterystyk. Do najciekawszych należą tutaj odchyłki prostopadłości płaszczyzny do osi i osi do płaszczyzny, a przede wszystkim odchyłki współosiowości dwóch powierzchni walcowych. Istotne jest to, że badania niepewności można wykonać dla różnych strategii pomiaru, a w szczególności dla różnych „rozmiarów” elementów bazowych [2, 4]. Oczywiście, korzystanie z wyników badań niepewności wykonanych na kątowniku walcowym jest ograniczone do przedmiotów o zbliżonych wymiarach. Dodatkowo pojawia się pytanie, czy wyniki badań niepewności pomiaru odchyłki współosiowości wałków można wykorzystać w celu udokumentowania niepewności pomiaru odchyłki współosiowości otworów, znacznie ważniejszej, bo częściej spotykanej w dokumentacji części maszyn.

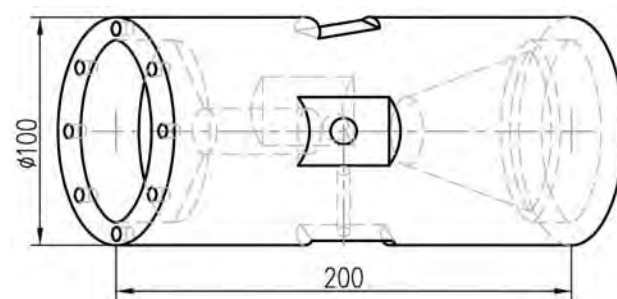
Czwarta możliwość to posłużenie się uniwersalnym artefaktem o bardziej złożonym kształcie. Przykłady takich artefaktów to QFM-Würfel i Multi-Feature Check. Pierwszy z nich (rys. 1) to kostka z zeroduru o wymiarach 180 mm × 160 mm × 100 mm, z otworami walcowymi, stożkowym (zarówno o osiach równoległych, jak i prostopadłych), otworami w kształcie półkuli i jedną płaszczyzną nachyloną względem ścian kostki. Przedmiot został zaprojektowany przez Laboratorium QFM Uniwersytetu Erlangen-Nuremberg i wykonany przez firmę C. Zeiss [5].

Drugi artefakt (rys. 2) to przedmiot w kształcie walca, wykonany z aluminium (z utwardzoną powierzchnią), oferowany przez firmę Metrys DKD Calibration Lab (Aalen) [6]. Przy użyciu tego przedmiotu wzorcowego można przeprowadzać analizę niepewności pomiaru następujących charakterystyk: średnice (otworu i wałka), długość (odległość płaszczyzn rów-



Rys. 1. Przedmiot wzorcowy QFM-Würfel

Fig. 1. Artefact QFM-Würfel



Rys. 2. Przedmiot wzorcowy Multi-Feature Check [6]

Fig. 2. Artefact Multi-Feature Check [6]

noległych), kąt stożka oraz odchyłki prostoliniowości, płaskości, okrągłości, walcowości, równoległości, prostopadłości, nachylenia, pozycji, symetrii, współśrodkowości, współosiowości i bicia. Szczególnie interesująca jest tutaj możliwość oceny niepewności pomiarów związanych z szykiem otworów.

Tego rodzaju przedmioty wzorcowe nadają się jednak bardziej do wykonania porównań międzylaboratoryjnych, niż do wyznaczenia niepewności pomiaru, z myślą o wykorzystaniu tej wartości jako niepewności pomiaru charakterystyk „podobnych” przedmiotów.

W Europie najbardziej znane jest oprogramowanie symulacyjne VCMM, oferowane przez PTB. Aktualnie oprogramowanie to jest przeznaczone dla maszyn portalowych oraz wysięgnikowych z ruchomą kolumną i poziomym ramieniem i może współpracować z programami Calypso i Quindos [7]. Oprogramowanie to jest instalowane na komputerze maszyny pomiarowej. Oprogramowanie uwzględnia błędy geometryczne maszyny, w tym błędy spowodowane odkształceniami cieplnymi przewodnic i wzorców, niepewność wzorcowania maszyny, dryft, błędy pochodzące od systemu głowicy pomiarowej i błędy pochodzące od mierzonego przedmiotu (temperatury i chropowatość powierzchni). Dane o błędach geometrycznych są pozyskiwane na podstawie wyników specjalnie wykonanego eksperymentu opracowanego za pomocą programu KALKOM.

Oprogramowanie EMU do wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych opracowano w Laboratorium Metrologii ATH w ramach projektu badawczo-rozwojowego i wdrożono do tej pory już w kilkunastu przedsiębiorstwach. Podstawy teoretyczne, na podstawie których powstało oprogramowanie, są opisane we wcześniejszych publikacjach [8–16]. Oprogramowanie zostało opracowane przy następujących założeniach:

- w pomiarach współrzędnościowych niepewność pomiaru jest analizowana osobno dla każdej charakterystyki,
- niepewność pomiaru złożona, dla określonej charakterystyki, jest obliczana na podstawie wzoru (modelu) wyrażającego tę charakterystykę jako funkcję różnic współrzędnych charakterystycznych punktów przedmiotu,
- do bilansu niepewności wchodzi wszystkie błędy geometryczne i błędy głowicy maszyny pomiarowej, zidentyfikowane na podstawie wyników wzorcowania, a także błąd temperaturowy,
- modele pomiaru wykorzystują minimalną liczbę tzw. charakterystycznych punktów przedmiotu,
- oprogramowanie pracuje na innym komputerze lub na komputerze maszyny pomiarowej w trybie off-line.

Oprogramowanie jest bardzo łatwe w użyciu. Parametry konstrukcyjne maszyny oraz dane zawierające informacje o błędach maszyny (otrzymane w czasie wzorcowania maszyny) są wprowadzane przez dostawcę oprogramowania w momencie zakupu licencji. Dane dotyczące błędów maszyny są uaktualniane przez dostawcę po każdym kolejnym wzorcowaniu.

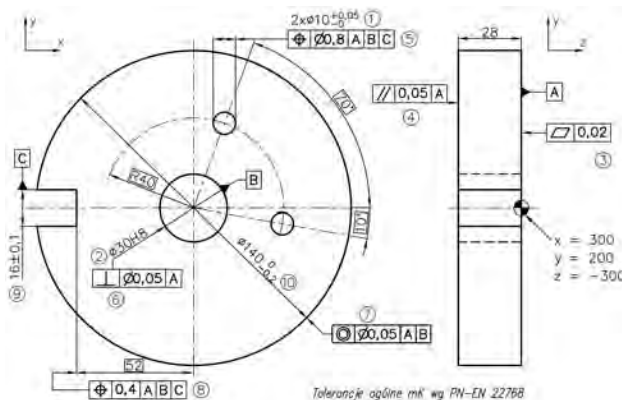
## 2. Obsługa oprogramowania

### 2.1. Analiza rysunku konstrukcyjnego i dokumentowanie strategii pomiaru

W niniejszej pracy zakłada się, że rysunek konstrukcyjny jest wykonany zgodnie z aktualnie obowiązującymi zasadami, tzn. że wymiary tolerowane stosowane są jedynie w odniesieniu do elementów wymiarowalnych, a pozostałe wymagania określane są za pomocą tolerancji geometrycznych, w szczególności tolerancji pozycji [17–19].

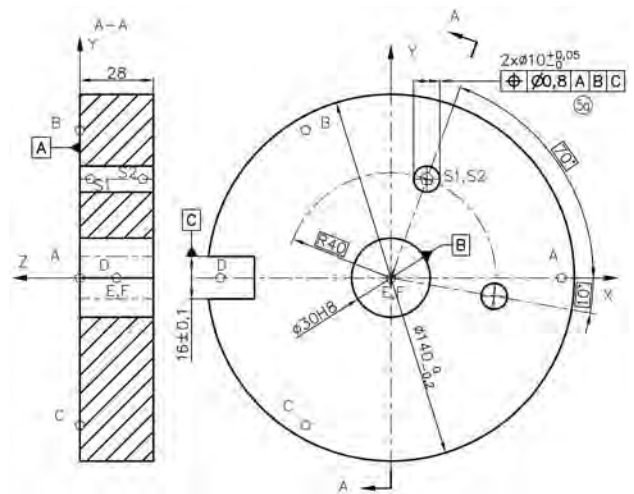
Analiza rysunku następuje już na etapie projektowania strategii pomiaru. Wtedy też podejmuje się decyzję o położeniu i orientacji przedmiotu w przestrzeni maszyny i o konfiguracji trzpieni pomiarowych. W celu udokumentowania tej strategii, z myślą o późniejszym użyciu programu EMU, na poszczególne rzuty rysunku konstrukcyjnego należy nanieść osie układu współrzędnych maszyny. W czasie pomiaru na wspomniany rysunek należy nanieść dodatkowo współrzędne jednego punktu przedmiotu w układzie maszyny. Przykładowy rysunek przedmiotu uzupełniony o osie układu współrzędnych maszyny oraz współrzędne jednego punktu (punktu osi przedmiotu w płaszczyźnie A), identyfikujące jednoznacznie położenie i orientację przedmiotu w czasie pomiaru, pokazano na rys. 3. Na rysunku ponumerowano przewidziane do pomiaru charakterystyki.

Z rysunku wynika, że przedmiotem pomiaru jest 12 charakterystyk: pięć wymiarów (1 –  $\varnothing 10$  mm dotycząca dwóch otworów, 2 –  $\varnothing 30$  mm, 9 – szerokość rowka 16 mm, 10 – średnica zewnętrzna  $\varnothing 140$  mm), jedna odchyłka kształtu (3 – odchyłka płaskości), dwie odchyłki kierunku (4 – odchyłka równoległości, 6 – odchyłka prostokątności) i cztery odchyłki położenia (7 – odchyłka współosiowości, 5 – odchyłka po-



Rys. 3. Rysunek przykładowego przedmiotu uzupełniony o oznaczenia osi układu współrzędnych maszyny z ponumerowanymi charakterystykami

Fig. 3. A drawing of exemplary workpiece supplemented with coordinate system of measuring machine and numbered characteristics



Rys. 4. Dokumentacja strategii pomiaru dla charakterystyki 5a (odchyłka pozycji osi otworu względem układu trzech baz); na odpowiednie rzuty przedmiotu naniesiono lokalny układ współrzędnych; rysunek zawiera również punkty charakterystyczne omówione w następnym rozdziale

Fig. 4. Documentation of measurement strategies for characteristic 5a (position deviation of hole's axis in regard to datum system); the local coordinate systems are presented on appropriate views of workpiece; the drawing contains also characteristic points described in next chapter

zycji osi dwóch otworów  $\varnothing 10$  mm i 8 – odchyłka pozycji dna rowka). Charakterystyki 1 i 5 występują dwukrotnie. Dokumentację strategii pomiaru do obliczeń niepewności pomiaru poszczególnych charakterystyk najlepiej wykonać na osobnych kopiach rysunku. Jeszcze lepiej, jeśli poszczególne rysunki zawierają jedynie te elementy, które definiują daną charakterystykę. Dla przykładu, odpowiedni rysunek dla charakterystyki nr 5a, pokazano na rys. 4. Na rysunku, oprócz elementów potrzebnych do zdefiniowania charakterystyki 5a (odchyłka pozycji osi względem układu baz), pokazano wymiary gabarytowe ( $\varnothing 140$  mm i grubość tarczy 28 mm), potrzebne do obliczenia współrzędnych punktów charakterystycznych. Na tym rysunku nanosi się osie lokalnego układu współrzędnych, najlepiej zgodnie co do orientacji z osiami układu współrzędnych maszyny, a w każdym razie osie układu prawoskrętnego.

W celu wyznaczenia danej charakterystyki potrzebne jest wykonanie „pomiaru” jednego lub kilku elementów geometrycznych – w zaprezentowanym przykładzie czterech:

- płaszczyzny stanowiącej bazę główną A,
- walca (lub okręgu), którego oś (środek) stanowi bazę drugorzędą B,
- płaszczyzny (lub punktu) symetrii rowka, która (który) stanowi bazę trzeciorzędą C,
- walca (lub okręgu), dla którego osi (środek) wyznaczana jest odchyłka pozycji.

Każdy z tych elementów jest próbkowany za pomocą odpowiedniego trzpienia – parametry  $xt$ ,  $yt$  i  $zt$  końcówki tego trzpienia będą stanowiły dane do programu, wobec tego wskazane jest, szczególnie przy znacznej liczbie trzpieni, umieszczenie na rysunku przedmiotu odpowiedniego szkicu obrazującego orientację użytych trzpieni i ich parametry. W przykładowym zadaniu wszystkie cztery elementy geometryczne były próbkowane za pomocą trzpienia zorientowanego pionowo



**Tab. 1.** Dane dla charakterystyki „odchyłka pozycji osi – pole walcowe” – w układzie przedmiotu**Tab. 1.** Data for characteristic „axis position deviation – cylindrical tolerance zone” – in workpiece coordinate system



Punkt	$x$	$y$	$z$	$r$	$\varphi$	$n$	$d$	$xt$	$yt$	$zt$
A	65	0	0	65	0	-	-	0	0	-100
B	-32,5	56,29	0	65	120	-	-	0	0	-100
C	-32,5	-56,29	0	65	240	-	-	0	0	-100
D	-65	0	-14	-	-	-	-	0	0	-100
E	0	0	-14	-	-	-	-	0	0	-100
F	0	0	-14	-	-	-	-	0	0	-100
S1	13,68	37,59	-4	40	70	4	10	0	0	-100
S2	13,68	37,59	-24	40	70	4	10	0	0	-100

wo. Dokładniej mówiąc, najpierw próbkowano powierzchnię stołu (w tym miejscu, w którym następnie położono przedmiot), potem położono przedmiot i próbkowano powierzchnie elementów tolerowanych. Trzpień miał długość 100 mm, stąd parametry ( $xt = 0$ ,  $yt = 0$ ,  $zt = -100$ ). Parametry końcówki trzpienia otrzymuje się w procesie kwalifikacji, przy czym dla celów oprogramowania EMU wystarczy je podawać w postaci zaokrąglonej do całkowitych milimetrów. Niezbędne dane, potrzebne do zdefiniowania charakterystyki pokazanej na rys. 4, zebrano w tab. 1. W tabelicy zestawiono współrzędne punktów charakterystycznych w układzie współrzędnych przedmiotu (dla punktów A, B i C również w układzie biegunowym). Jednak do zdefiniowania zadania konieczne jest przeliczenie tych współrzędnych do układu maszyny pomiarowej. Tablica zawiera również parametry użytych końcówek trzpieni oraz liczby  $n$  punktów próbkowania i średnicy  $d$  elementu w przypadku punktów charakterystycznych należących do osi.

## 2.2. Wybór modelu i punktów charakterystycznych

Dla każdej charakterystyki, dla której ma być przeprowadzona analiza niepewności pomiaru, należy dobrać właściwy model oraz określić punkty charakterystyczne i inne potrzebne dane. Wybór modelu rozpoczyna się od wybrania (kliknięcia) właściwego symbolu wymiaru lub tolerancji geometrycznej. Obsługiwane przez oprogramowanie charakterystyki zostały zgrupowane na pasku narzędziowym, z uwzględnieniem klasyfikacji odchyłek geometrycznych zawartej w ISO 1101 [18] (rys. 5).

Znaczenie poszczególnych ikon jest następujące:

-  pomiar odległości
-  pomiar średnicy wałka/otworu

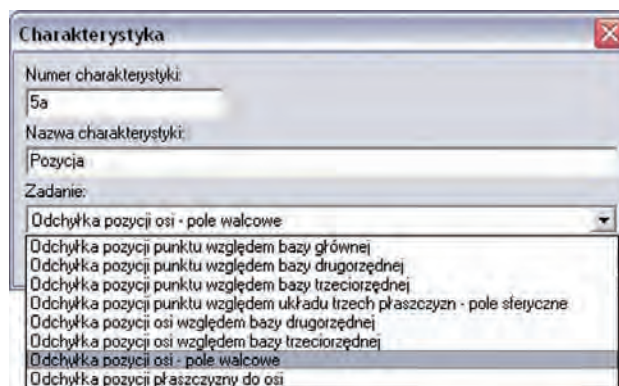
pozostałe zgodnie z ISO 1101 [18].

**Rys. 5.** Okno główne oprogramowania EMU. Widoczny jest pasek narzędziowy z grupami charakterystyk**Fig. 5.** Main window of software EMU. Tool bar with groups of characteristics is visible

Po wybraniu z paska narzędziowego ikony właściwej grupy charakterystyk (rys. 5) pojawi się okno dialogowe z listą dostępnych charakterystyk – należy wybrać odpowiedni przypadek. Aktualnie oprogramowanie zawiera około 50 różnych charakterystyk.

W analizowanym przykładzie wybrano symbol tolerancji pozycji, a następnie charakterystykę „Odchyłka pozycji osi – pole walcowe” (rys. 6).

Wybrana charakterystyka zostanie dodana do listy. Po uruchomieniu analizy dla dodanej charakte-

**Rys. 6.** Okno dialogowe wyboru charakterystyki**Fig. 6.** Dialogue window for characteristic choice

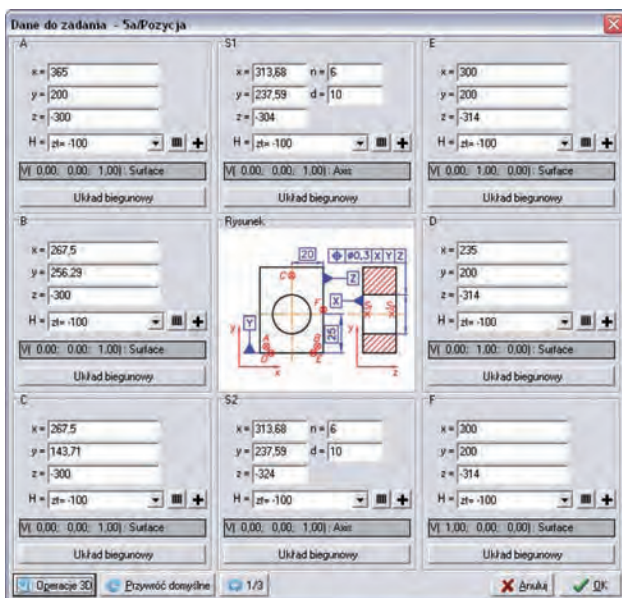
rystyki (podwójnym kliknięciem na liście charakterystyk w oknie głównym programu) pojawi się kolejne okno dialogowe (rys. 7), zawierające m.in. przykładowy rysunek wybranej charakterystyki (rys. 8).

Jak widać, rysunek ten różni się znacznie od rysunku mierzonego przedmiotu, jednak w obu przypadkach celem pomiaru jest odchyłka pozycji osi względem układu 3 baz i pole tolerancji ma postać walca. Na rysunku dla bazy głównej zdefiniowano trzy punkty charakterystyczne (A, B i C), dla bazy drugorzędnej – dwa (D i E), a dla bazy trzeciorzędnej – jeden (F). Jak widać, liczba punktów charakterystycznych jest równa minimalnej liczbie punktów, potrzebnej do zdefiniowania układu baz (układu współrzędnych). Dla otworu o tolerowanej pozycji osi zdefiniowano dwa punkty charakterystyczne ( $S_1$  i  $S_2$ ). Dla zdefiniowania analogicznego układu baz dla przykładowego przedmiotu odpowiednie punkty charakterystyczne (z zachowaniem oznaczeń zgodnych z tymi z okna dialogowego) zaznaczono na rys. 4. W odróżnieniu od rysunku w oknie dialogowym, punkty charakterystyczne dla bazy drugorzędnej stanowią (zamiast punktów płaszczyzny) środek otworu i punkt symetrii rowka, a punkt charakterystyczny dla bazy trzeciorzędnej – środek otworu (ponownie).

Dla ułatwienia uczenia się obsługi programu, w oknie dialogowym znajdują się domyślne

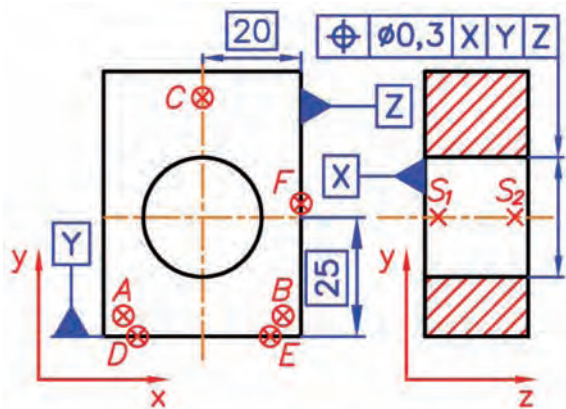
dane (współrzędne punktów charakterystycznych), zgodne ze znajdującym się tam rysunkiem i odpowiadające założeniu, że pomiar odbywa się przy ustawieniu przedmiotu wzdłuż pokazanych na rysunku osi układu współrzędnych maszyny.

W programie przewidziano pewne narzędzia ułatwiające wprowadzanie danych. Jednym z tych narzędzi jest możliwość wyboru przykładowego rysunku spośród trzech (przycisk „1/3” na rys. 7), różniących się orientacją przedmiotu w układzie współrzędnych maszyny. Inne narzędzia to możliwość wprowadzania współrzędnych punktów charakterystycznych w układzie biegunowym oraz możliwość przesuwania i obracania przedmiotu. Żeby jednak nie zaburzać podstawowego toku postępowania, narzędzia te (i inne) omówiono w końcowej części referatu.



Rys. 7. Okno dialogowe charakterystyki „Odchyłka pozycji osi – pole walcowe”

Fig. 7. Dialogue window for characteristic “Axis position deviation – cylindrical tolerance zone”



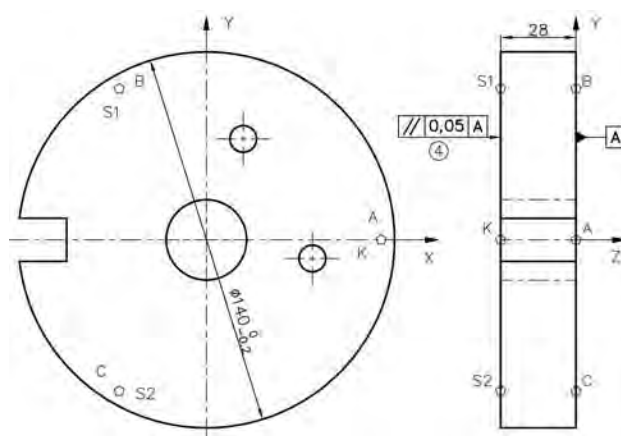
Rys. 8. Przykładowy rysunek przedmiotu z charakterystyką „Odchyłka pozycji osi – pole walcowe” oraz punkty charakterystyczne dla modelu pomiaru

Fig. 8. A sample drawing of workpiece with characteristic “Axis position deviation – cylindrical tolerance zone” as well as characteristic points for measurement model

W przytoczonym przykładzie liczba punktów charakterystycznych wynosi 8. W ogólnym przypadku liczba punktów charakterystycznych, w zależności od złożoności odpowiedniego modelu matematycznego dla danej charakterystyki, nie przekracza tej wartości.

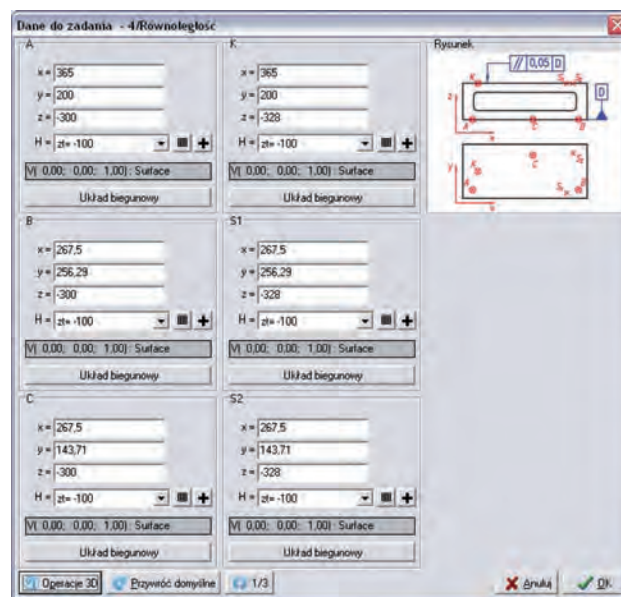
### 2.3. Przykład dla odchyłki równoległości płaszczyzn

Odpowiednio zmodyfikowany rysunek konstrukcyjny, dokumentujący strategię pomiaru dla potrzeb oprogramowania EMU dla charakterystyki nr 4, pokazano na rys. 9. Oprócz elementów potrzebnych do zdefiniowania charakterystyki (odchyłka równoległości płaszczyzn) pokazano wymiary ga-



Rys. 9. Dokumentacja strategii pomiaru dla charakterystyki 4 (odchyłka równoległości płaszczyzn); na odpowiednie rzuty przedmiotu naniesiono lokalny układ współrzędnych; rysunek zawiera również punkty charakterystyczne

Fig. 9. Documentation of measurement strategy for characteristic no. 4 (parallelism of two planes); the local coordinate system is presented of appropriate views of drawing; the drawing contains also the characteristic points



Rys. 10. Okno dialogowe charakterystyki „odchyłka równoległości płaszczyzn”

Fig. 10. Dialogue window for characteristic „parallelism of two planes”



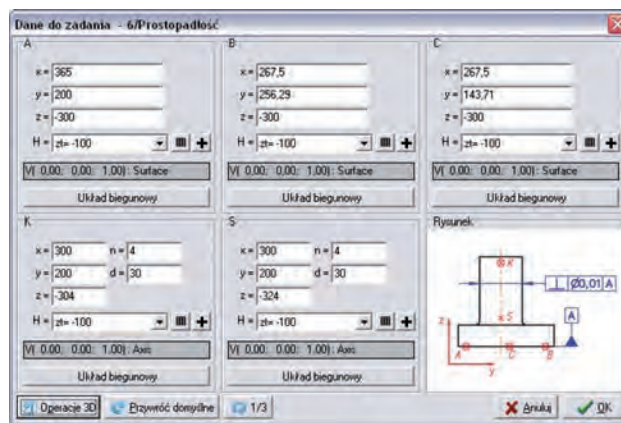
barytowe ( $\varnothing 140$  mm i grubość tarczy 28 mm), potrzebne do obliczenia współrzędnych punktów charakterystycznych.

W celu wyznaczenia tej charakterystyki potrzebne jest wykonanie „pomiaru” dwóch elementów geometrycznych:

- płaszczyzny stanowiącej bazę D,
- płaszczyzny, dla której wyznaczana jest odchyłka równoległości.

Okno dialogowe dla tej charakterystyki pokazano na rys. 10. Model pomiaru zawiera 6 punktów charakterystycznych.

Oba elementy były próbkowane za pomocą tego samego trzpienia, tak więc parametry  $xt$ ,  $yt$  i  $zt$  końcówki tego trzpienia są takie same, jak poprzednio. Potrzebne dane zestawiono w tab. 2.



**Rys. 12.** Okno dialogowe charakterystyki „odchyłka prostopadłości osi do płaszczyzny”

**Fig. 12.** Dialogue window of characteristic „perpendicularity of axis to a plane”

**Tab. 2.** Dane dla charakterystyki „odchyłka równoległości płaszczyzn” – w układzie przedmiotu

**Tab. 2.** Data for characteristic „parallelism of two planes” – in workpiece coordinate system

Punkt	x	y	z	r	$\phi$	n	d	xt	yt	zt
A	65	0	0	65	0	-	-	0	0	-100
B	-32,5	56,29	0	65	120	-	-	0	0	-100
C	-32,5	-56,29	0	65	240	-	-	0	0	-100
K	65	0	-28	65	0	-	-	0	0	-100
S1	-32,5	56,29	-28	65	120	-	-	0	0	-100
S2	-32,5	-56,29	-28	65	240	-	-	0	0	-100

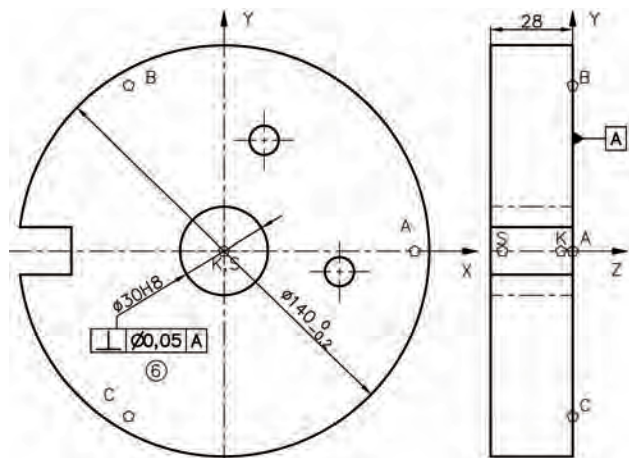
zano wymiary gabarytowe ( $\varnothing 140$  mm i grubość tarczy 28 mm), potrzebne do obliczenia współrzędnych punktów charakterystycznych.

W grupie charakterystyk dotyczących odchyłki prostopadłości nie różni się odchyłki prostopadłości osi otworu i osi wałka. Przykładowy rysunek w oknie dialogowym charakterystyki „Odchyłka prostopadłości osi do płaszczyzny” jest rysunkiem dotyczącym osi wałka (rys. 12), co nie przeszkadza w prawidłowym użyciu programu EMU.

W celu wyznaczenia tej charakterystyki potrzebne jest wykonanie „pomiaru” dwóch elementów geometrycznych:

- płaszczyzny stanowiącej bazę A,
- walca lub dwóch okręgów dla otworu, dla którego wyznaczana jest odchyłka prostopadłości osi.

Oba elementy były próbkowane za pomocą tego samego trzpienia. Tak więc parametry  $xt$ ,  $yt$  i  $zt$  końcówki tego trzpienia są takie same jak poprzednio. Potrzebne dane zestawiono w tab. 3.



**Rys. 11.** Punkty charakterystyczne – „odchyłka prostopadłości osi do płaszczyzny”

**Fig. 11.** Characteristic points – „perpendicularity of axis to a plane”

### 2.4. Przykład dla odchyłki prostopadłości osi do płaszczyzny

Odpowiednio zmodyfikowany rysunek konstrukcyjny, dokumentujący strategię pomiaru dla potrzeb oprogramowania EMU, dla charakterystyki nr 6, pokazano na rys. 11. Oprócz elementów potrzebnych do zdefiniowania charakterystyki (odchyłka prostopadłości osi do płaszczyzny) poka-

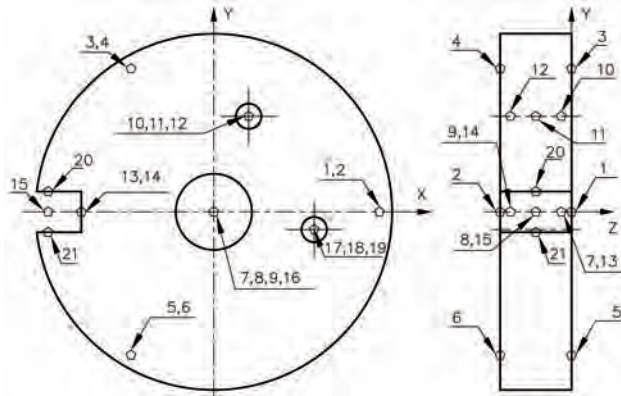
**Tab. 3.** Dane do charakterystyki „odchyłka prostopadłości osi do płaszczyzny” – w układzie przedmiotu

**Tab. 3.** Data for characteristic „perpendicularity of axis to plane” – in workpiece coordinate system

Punkt	x	y	z	r	$\phi$	n	d	xt	yt	zt
A	65	0	0	65	0	-	-	0	0	-100
B	-32,5	56,29	0	65	120	-	-	0	0	-100
C	-32,5	-56,29	0	65	240	-	-	0	0	-100
K	0	0	-4	-	-	4	30	0	0	-100
S	0	0	-24	-	-	4	30	0	0	-100

### 2.5. Zestawienie danych dla wszystkich charakterystyk przykładowego przedmiotu

Jak można zauważyć, wyznaczenie niepewności pomiaru, dla wszystkich charakterystyk przykładowego przedmiotu, wymaga wykorzystania 21 punktów charakterystycznych. W poszczególnych przypadkach niektóre z tych punktów mają różne oznaczenia. Na rys. 13 zaznaczono wszystkie punkty charakterystyczne, niezbędne do analizy niepewności po-



**Rys. 13.** Punkty charakterystyczne wykorzystane do wyznaczenia niepewności pomiaru wszystkich charakterystyk pokazanych na rys. 3

**Fig. 13.** Characteristic points used to estimate the measurement uncertainty of all characteristics shown in fig. 3

**Tab. 4.** Numery charakterystyk i odpowiadające im wymagane punkty charakterystyczne

**Tab. 4.** Numbers of characteristics and corresponding characteristic points

Nr charakterystyki wg rys. 3	Nr punktu i oznaczenie tego punktu w modelu charakterystyki
1a	11=S
1b	18=S
2	8=S
3	1=A; 3=B; 5=C
4	1=K; 2=A; 3=S1; 4=B; 5=S2; 6=C
5a	1=A; 3=B; 5=C; 15=D; 8=E=F; 10=S1; 12=S2
5b	1=A; 3=B; 5=C; 15=D; 8=E=F; 17=S1; 19=S2
6	1=K; 3=S1; 5=S2; 7=A; 9=B
7	7=A; 9=B; 16=S
8	1=A; 3=B; 5=C; 15=D; 8=E=F; 13=S1; 14=S2
9	1=A; 3=B; 5=C; 15=D; 8=E; 20=F; 21=S
10	16=S

**Tab. 5.** Punkty charakterystyczne i inne potrzebne do wykonania obliczeń niepewności pomiaru dla charakterystyk pokazanych na rys. 3

**Tab. 5.** Characteristic points and others, necessary for estimation of measurement uncertainty for characteristics shown in fig. 3

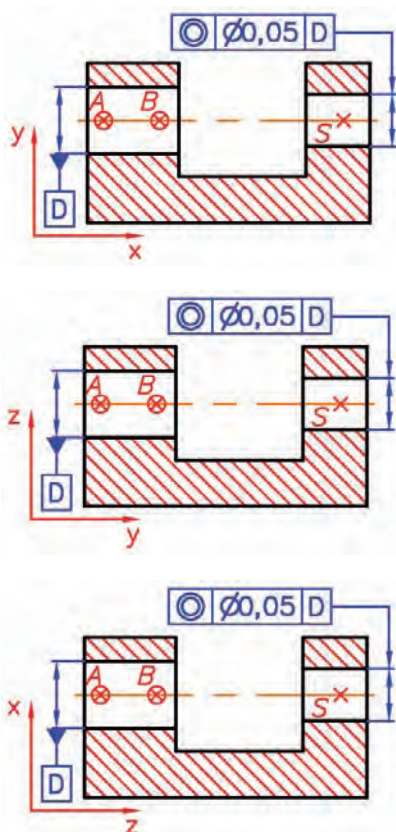
Punkt	Układ lokalny					Układ maszyny			n	d	xt	yt	zt	
	x	y	z	r	φ	x	y	z						
1	65	0	0	65	0	365	200	-300	-	-	0	0	-100	
2	65	0	-28	65	0	365	200	-328	-	-	0	0	-100	
3	-32,5	56,29	0	65	120	267,5	256,29	-300	-	-	0	0	-100	
4	-32,5	56,29	-28	65	120	267,5	256,29	-328	-	-	0	0	-100	
5	-32,5	-56,3	0	65	240	267,5	143,71	-300	-	-	0	0	-100	
6	-32,5	-56,3	-28	65	240	267,5	143,71	-328	-	-	0	0	-100	
7	0	0	-4	-	-	300	200	-304	4	30	0	0	-100	
8	0	0	-14	-	-	300	200	-314	4	30	0	0	-100	
9	0	0	-24	-	-	300	200	-324	4	30	0	0	-100	
10	13,68	37,59	-4	40	70	313,68	237,59	-304	4	10	0	0	-100	
11	13,68	37,59	-14	40	70	313,68	237,59	-314	4	10	0	0	-100	
12	13,68	37,59	-24	40	70	313,68	237,59	-324	4	10	0	0	-100	
13	-52	0	-4	-	-	248	200	-304	4	30	0	0	-100	
14	-52	0	-24	-	-	248	200	-324	4	30	0	0	-100	
15	-65	0	-14	-	-	235	200	-314	-	-	0	0	-100	
16	0	0	-14	-	-	300	200	-314	4	140	0	0	-100	
17	39,39	-6,95	-4	40	-10	339,39	193,05	-304	4	10	0	0	-100	
18	39,39	-6,95	-14	40	-10	339,39	193,05	-314	4	10	0	0	-100	
19	39,39	-6,95	-24	40	-10	339,39	193,05	-324	4	10	0	0	-100	
20	-65	8	-14	-	-	235	208	-314	-	-	0	0	-100	
21	-65	-8	-14	-	-	235	192	-314	-	-	0	0	-100	
Wektor przesunięcia						[300; 200; -300]								

miaru wspomnianych charakterystyk. W tab. 4 przyporządkowano wszystkie punkty charakterystyczne do poszczególnych charakterystyk.

Przygotowując się do pracy z programem EMU warto wypełnić tabelkę potrzebnymi danymi. Jako przykład, w tab. 5 zestawiono współrzędne punktów charakterystycznych w układzie przedmiotu i w układzie maszyny oraz określono dane trzpieni użytych do pomiaru poszczególnych punktów. W zaprezentowanej tabelce występuje nadmiar danych – umieszczono zarówno dane źródłowe, jak i te będące efektem przeliczeń. Użytkownik oprogramowania gromadzi jedynie dane niezbędne, a to, które zaliczy do niezbędnych zależy od dostępności danych, znajomości programu i przyzwyczajień.

### 2.6. Interfejs użytkownika – inne możliwości oprogramowania

Jak już wspomniano, program umożliwia łatwy wybór jednej spośród trzech orientacji przedmiotu w układzie współrzędnych maszyny (rys. 14). Ułatwia to wprowadzanie danych, ale również pozwala na wykonanie transformacji układu współrzędnych w przypadku, kiedy przedmiot zmienia orientację w przestrzeni pomiarowej.



Rys. 14. Trzy możliwe do wyboru orientacje przedmiotu. Przykład dla odchyłki współosiowości otworów

Fig. 14. Three possibilities of orientation of workpiece in measuring volume. An example of coaxiality measurement

Inne narzędzie, to możliwość wprowadzania współrzędnych punktów charakterystycznych w układzie biegunowym (rys. 15). Po naciśnięciu przycisku „Układ biegunowy” należy wybrać odpowiednią płaszczyznę układu współrzędnych, wprowadzić współrzędne punktu będącego środkiem układu biegunowego oraz współrzędne punktu w układzie biegu-

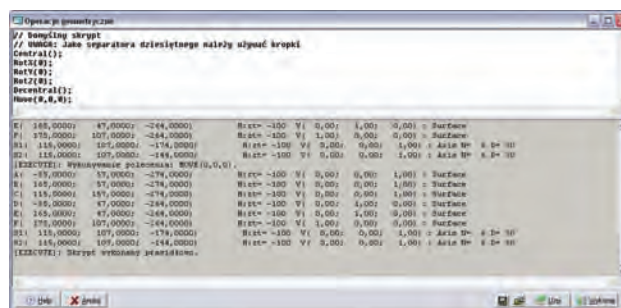


Rys. 15. Wprowadzanie danych w układzie biegunowym: a) okno dialogowe, b) współrzędne w układzie kartezjańskim

Fig. 15. Input data in polar coordinate system: a) dialogue window, b) coordinates in cartesian coordinate system

nowym. Współrzędne punktu zostaną przeliczone do układu kartezjańskiego.

Dla każdej charakterystyki, ściślej mówiąc dla wszystkich punktów charakterystycznych tej charakterystyki, możliwe jest wykonywanie operacji geometrycznych przestrzennych, tj. przesuwanie i obroty wszystkich punktów wokół osi układu współrzędnych o dowolnie zadane wektory i kąty. Operacje te przeprowadza się za pomocą prostego języka skryptowego w specjalnym module uruchamianym przyciskiem „Operacje 3D” (rys. 12, rys. 16).



Rys. 16. Okno dialogowe modułu operacji geometrycznych

Fig. 16. Dialogue window of geometrical operations module

Dostępne polecenia języka skryptowego są następujące:

- „Central()” powoduje takie przesunięcie przedmiotu, że środek ciężkości jego punktów charakterystycznych znajdzie się w początku układu współrzędnych. Wektor przesunięcia zostaje zapamiętany i może zostać wykorzystany w celu powrotu do pierwotnej pozycji za pomocą polecenia „Decentral()”,
- „RotX(kąt\_w\_stopniach)”, „RotY(kąt\_w\_stopniach)”, „RotZ(kąt\_w\_stopniach)” służą do obrócenia przedmiotu wokół odpowiedniej osi układu współrzędnych o zadany kąt,
- „Move(x,y,z)” służy do przemieszczenia przedmiotu o zadany wektor [x, y, z].

Polecenia mogą być wykonywane w dowolnej kolejności, ale mogą również być pominięte, przez ich zamianę na komentarz za pomocą sekwencji znaków „//”.

Domyślny skrypt zawiera sekwencję poleceń, które nie powodują żadnych transformacji. Wyniki działania poszczególnych poleceń wyświetlane są w oknie „Operacje geometryczne”, co umożliwia upewnienie się, że uzyskano zamierzony efekt.

Użytkownik maszyny pomiarowej często przygotowuje sobie kilka lub nawet kilkanaście, wykorzystywanych w pomiarach konfiguracji trzpieni. Konfiguracje te są przechowywane w magazynie na maszynie pomiarowej albo w specjalnej szafce. Kwalifikacje tych trzpieni wykonywane są zwykle co jakiś czas (niekoniecznie przed każdym pomiarem). Konfi-



guracjom tym często przypisywane są nazwy, zrozumiałe dla obsługi maszyny. W takim przypadku, użytkownik oprogramowania EMU może sobie stworzyć bazę używanych trzpień pomiarowych. Dla ułatwienia korzystania z tej bazy oprogramowanie EMU umożliwia wprowadzenie zdjęć poszczególnych konfiguracji (rys. 17).



Rys. 17. Okno wyboru trzpień

Fig. 17. Style choice window

Szczególną zaletą oprogramowania jest to, że wszystkie potrzebne dane do wyznaczenia niepewności pomiaru dla wszystkich charakterystyk danego przedmiotu, zapisywane są w pliku i powtórzenie obliczeń niepewności dla pomiarów wykonanych na danej maszynie po kolejnych wzorcowaniach maszyny jest wykonywane po naciśnięciu jednego przycisku w menu.

### 2.7. Dokumentowanie strategii pomiaru

Wyniki obliczeń niepewności pomiaru można na bieżąco odczytywać z ekranu. Po wykonaniu obliczeń dla wszystkich charakterystyk możliwe jest wydrukowanie protokołu pomiarowego. Protokół zawiera informacje o dostawcy oprogramowania, dane użytkownika, dane o przedmiocie pomiaru oraz wykaz charakterystyk wraz z niepewnościami (rys. 18).

<b>EMU - Analityczne wyznaczenie niepewności pomiarów współrzędnościowych (2011.03)</b> Opracowanie: Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, <b>Laboratorium Metrologii</b> Kontakt: prof. ATH dr hab. inż. Władysław Jakubiec, tel. 033 82 79 321, e-mail: wjakubiec@ath.eu					
Logo		Licencja nr 000 dla: <b>DEMO [x(-135, 615), y(-143, 497), z(-374, 126)]</b>			
Nr rysunku	nie podano	Nazwa części	Przedmiot	Nr seryjny	nie podano
Zlecenie	nie podano	Operator	nie podano	Data	nie podano
Numer char.	Nazwa charakterystyki	Model			Niepewność
5a	Pozycja	Odchyłka pozycji osi - pole walcowe			0,0057
4	Równoległość	Odchyłka równoległości płaszczyzn			0,0024
6	Prostopadłość	Odchyłka prostopadłości osi do płaszczyzny			0,0023

Rys. 18. Raport z analizy niepewności pomiaru

Fig. 18. Report of measurement uncertainty analysis

Nr/Nazwa char.: 5a/Pozycja Odchyłka pozycji osi - pole walcowe						
	X	Y	Z	Głowica	Wektor kierunkowy	N D
A	365	200	-300	zI=-100	V( 0,00; 0,00; 1,00) : Surface	- -
B	267,5	256,29	-300	zI=-100	V( 0,00; 0,00; 1,00) : Surface	- -
C	267,5	143,71	-300	zI=-100	V( 0,00; 0,00; 1,00) : Surface	- -
D	235	200	-314	zI=-100	V( 0,00; 1,00; 0,00) : Surface	- -
E	300	200	-314	zI=-100	V( 0,00; 1,00; 0,00) : Surface	- -
F	300	200	-314	zI=-100	V( 1,00; 0,00; 0,00) : Surface	- -
S1	313,68	237,59	-304	zI=-100	V( 0,00; 0,00; 1,00) : Axis	6 10
S2	313,68	237,59	-324	zI=-100	V( 0,00; 0,00; 1,00) : Axis	6 10
Wartość niepewności: 0,0057 µm						

Rys. 19. Fragment raportu szczegółowego

Fig. 19. Fragment of detailed report

Istnieje również możliwość uzyskania rozszerzonej postaci protokołu. Wtedy dla każdej charakterystyki otrzymuje się rysunek zastosowanego modelu, współrzędne punktów charakterystycznych i dane dotyczące trzpień pomiarowych (rys. 19). Pozostałe elementy protokołu pozostają bez zmian. Dysponowanie tą postacią protokołu umożliwia weryfikację poprawności wykonania obliczeń zarówno co do wyboru modelu, jak i poprawności danych.

### 2.8. Deklaracja poprawności obliczeń

W ISO/TS 15530-4 [2] można znaleźć stwierdzenie, że dla większości zadań pomiarowych realizowanych na współrzędnościowych maszynach pomiarowych, zbudowanie klasycznego budżetu niepewności jest niepraktyczne z powodu złożoności procesu pomiarowego. Autorzy niniejszej publikacji zgadzają się z tym stwierdzeniem tylko częściowo, bowiem problem złożoności przestaje mieć znaczenie, kiedy znajdzie się efektywny algorytm, a następnie oprogramowanie, umożliwiające przeniesienie ciężaru obliczeń na komputer. Szczegóły algorytmów zastosowanych w oprogramowaniu EMU zostały opublikowane [8–16]. W publikacjach tych można znaleźć m.in. przykładowe bilanse niepewności [12]. Algorytmy te są bardzo złożone, a bilanse niepewności zawierają znaczną liczbę składników. Ich publikacja ma na celu przekonanie użytkownika o poprawności wykonywanych obliczeń. Użytkownik oprogramowania nie ma powodu wgłębiać się w szczegóły – powinien się skupić przede wszystkim na problematyce doboru odpowiedniego (prawidłowego) modelu.

Autorzy wspomnianego dokumentu (ISO/TS 15530-4) akceptują fakt, że szczegóły dotyczące obliczeń niepewności nie muszą być znane użytkownikowi oprogramowania. W dokumencie tym można jednak znaleźć stwierdzenie, że dostawcy oprogramowania do wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych powinni wyraźnie powiedzieć, które czynniki wpływające na niepewność (składniki niepewności pomiaru)

są w oprogramowaniu uwzględniane. W szczególności dostawca oprogramowania do wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych powinien określić:

- typy maszyn, dla których oprogramowanie jest odpowiednie,
- uwzględnione błędy maszyny,
- dla jakich warunków temperaturowych wykonywane są obliczenia,
- rodzaj głowicy i sposób próbkowania,
- charakterystyki, dla których szacowana jest niepewność.

Aktualnie oprogramowanie EMU umożliwia wyznaczenie niepewności pomiaru dla maszyn portalowych i maszyn wysięgnikowych z ruchomą kolumną i poziomym ramieniem oraz dla ramion pomiarowych. W obliczeniach uwzględniane są wszystkie błędy geometryczne (21) i błędy głowicy (w przypadku głowic mierzających należy wybrać stosowany sposób próbkowania, skaning lub pomiar punktowy). Błędy temperaturowe są uwzględniane odpowiednio do tego, czy stosowana jest korekcja temperaturowa. Niepewność jest wyznaczana dla pomiaru wymiarów i odchyłek geometrycznych.

### 3. Wnioski z wdrożeń programu

Oprogramowanie EMU wdrożono dotąd w kilkunastu przedsiębiorstwach. Do ciekawszych należą wdrożenia w Fiat Powertrain Polska i ANGA Uszczelnienia Mechaniczne. Ze względu na charakter produkcji, w niniejszej pracy posłużono się przykładem neutralnym.

W Fiat Powertrain Polska oprogramowanie jest stosowane do szacowania niepewności pomiaru dla wzorcowań oprzyrządowania i wyposażenia procesu produkcyjnego, wykonywanych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej PMM-C 12107 P. Maszyna ta jest jedną z najdokładniejszych maszyn pracujących w polskim przemyśle – błąd graniczny wskazań tej maszyny wyraża wzór  $0,6+L/600 \mu\text{m}$ . Laboratorium Metrologiczne FPP wykonuje wzorcowania znacznej części wyposażenia pomiarowego, a wspomniane przedmioty wzorcowań, ustawiaki itp. stanowią poważną część wszystkich wzorcowań. Wyznaczanie niepewności pomiaru dla wykonywanych wzorcowań należy do priorytetów zarządu przedsiębiorstwa.

W firmie „ANGA” Uszczelnienia Mechaniczne Sp. z o.o. wykonuje się uszczelnienia mechaniczne czołowe, które znajdują zastosowanie w różnych urządzeniach z wałem obrotowym, głównie w pompach wirowych i mieszalnikach. Uszczelnienia te są dostarczane na rynki krajowe i zagraniczne. Zarząd firmy przykłada dużą wagę do szeroko rozumianej problematyki jakości. Laboratorium Badawcze wyposażone jest w dwie współrzędnościowe maszyny pomiarowe CONTURA i profilometr FORM TALYSURF 120. Laboratorium Badawcze, akredytowane przez Polskie Centrum Akredytacji, nr akredytacji AB 701. Laboratorium stanowi profesjonalną bazę badawczą i pomiarową dla rozwoju nowych konstrukcji uszczelnień mechanicznych czołowych, produkcji wyrobów lotniczych oraz skomplikowanych elementów w oparciu o dokumentację klientów.

### 4. Wnioski końcowe

W referacie dokonano analizy problematyki wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych. Na tym tle zaprezentowano opracowane w ATH oprogramowanie EMU do analitycznego wyznaczania niepewności. Omówiono kolejne czynności potrzebne do wyznaczenia niepewności pomiaru z użyciem oprogramowania EMU. Przedstawiono również wnioski z przebiegu wdrożenia i stosowania oprogramowania w kilku przedsiębiorstwach.

Oprogramowanie EMU można stosować do oceny niepewności pomiarów wykonywanych na najpopularniejszych maszynach pomiarowych. W obliczeniach uwzględnione są najważniejsze składniki niepewności (błędy geometryczne, błędy głowicy, błędy temperaturowe). Tak więc oprogramowanie EMU spełnia wymagania sformułowane w ISO/TS 15530-4:2008.

Oprogramowanie jest łatwe w użyciu – wymaga jedynie dobrej znajomości zasad specyfikacji geometrii wyrobów (GPS). Przy okazji wdrażania oprogramowania następuje weryfikacja poprawności zastosowanej strategii pomiaru. W przekonaniu autorów oprogramowanie powinno znaleźć szerokie zastosowanie w przemyśle samochodowym i lotniczym.

Oprogramowanie jest rozwijane i udoskonalane. Ocenia się, że wbudowane modele pozwalają na wykonanie analizy niepewności dla ok. 80 % charakterystyk. W miarę potrzeb do oprogramowania są wprowadzane nowe modele.

### Bibliografia

1. ISO/TS 15530-3:2004 *Geometrical Product Specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 3: Use of calibrated workpieces or standards.*
2. ISO/TS 15530-4:2008: *Geometrical Product Specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation.*
3. Uściński M.: *Badanie stabilności wzorca KMG Check użytego w porównaniach międzylaboratoryjnych*, Coordinate 2007, [w:] *Postępy w metrologii współrzędnościowej*, red. Śladek J., Jakubiec W., Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2010, 23–30.
4. Jakubiec W., Płowucha W.: *Multimedialny kurs wyznaczania niepewności pomiarów w budowie maszyn*, „Pomiary, Automatyka, Kontrola” Vol. 56 nr 1, 2010, 90–91.
5. [www.qfm.uni-erlangen.de/mzwebsite/ausstattung/pruefkoerper].
6. Discher Ch., Hageney T.: *Determination of measuring uncertainty with the Multi-Feature-Check*, Innovation (The Magazine from Carl Zeiss) no. 10, Oberkochen 2008, s. 8.
7. Trenk M., Franke M., Schwenke H.: *The „Virtual CMM“ a software tool for uncertainty evaluation – practical application in an accredited calibration lab*. Proceedings of Uncertainty Analysis in Measurement and Design, 2004 Summer Topical Meeting, Pennsylvania State University, 2004.
8. Jakubiec W.: *Adequacy and generality conditions in estimation of uncertainty in measurements of geometrical quantities*. „Advances in Manufacturing Science and Technology” vol. 31 nr 4, 2007, 55–66.
9. Jakubiec W.: *Analityczne wyznaczanie niepewności pomiarów współrzędnościowych*. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Bielsko-Biała 2007, s. 159.
10. Jakubiec W.: *Methodology of analytical estimation of uncertainty of coordinate measurements*. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Measurement and Quality Control. Indian Institute of Technology Madras, International Measurement Confederation IMEKO. Chennai 2007, 150–155.
11. Jakubiec W.: *Analytical estimation of uncertainty of coordinate measurements of geometric deviations. Models based on distance between point and straight*. „Advances in Manufacturing Science and Technology” vol. 33 nr 2, 2009, 45–53.
12. Jakubiec W., Płowucha W.: *Methodology for uncertainty estimation of coordinate measurements*. 10<sup>th</sup> International Symposium on Measurement and Quality Control in Production ISMQC, Osaka 2010, F3-159, 1–4.
13. Jakubiec W.: *Estimation of uncertainty of coordinate measurements according to the type B method*. Key Engineering Materials Vol. 437, 2010, 253–257.



14. Jakubiec W., Płowucha W., Starczak M.: *Analytical evaluation of the coordinate measurements uncertainty*. [w:] *Advances in coordinate metrology*, ed. by Śladek J., Jakubiec W., Wyd. Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2010, 169–176.
15. Jakubiec W., Płowucha W., Starczak M.: *System off-line do wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych*. „Pomiary, Automatyka, Kontrola” Vol. 56 nr 1, 2010, 6–7.
16. Jakubiec W., Płowucha W., Starczak M.: *EMU – oprogramowanie do analitycznego wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych*. [w:] *Postępy w metrologii współrzędnościowej*, red. Śladek J., Jakubiec W., Wyd. Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2010, 82–89.
17. Humienny Z.: *State of art in standardization in GPS area – Keynote paper*, 10<sup>th</sup> CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing Specification and Verification for Assemblies, Shaker Verlag, Aachen, 2007.
18. ISO 1101:2006 *Geometrical product specifications and verification. Geometrical tolerancing. Tolerancing of form, orientation, location and run-out*.
19. ISO 286-1:2010 *Geometrical product specifications (GPS). ISO code system for tolerances on linear sizes. Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits*. ■

### Conclusions from implementation of the EMU software in industry

**Abstract:** The software EMU for coordinate measurement uncertainty estimation was developed at the Laboratory of Metrology of University of Bielsko-Biała within the research grant. Theoretical background on which the software is developed are presented in previous publications. The software is very easy to use. The design-type parameters and the data on the geometrical errors of the CMM are implemented by the software vendor. The data on the geometrical errors of the machine are updated after each calibration of the CMM. The user is able to create a database of the styli used and the measured workpieces with the characteristics. The easiest way to prepare the data for particular characteristic and simultaneously documenting the measuring strategy is following procedure: chose a characteristic model, determine the orientation of the characteristic model with accordance to the measured workpiece, select characteristic points on the CAD model of the measured workpiece, determine the characteristic-points' coordinates in the workpiece coordinate system, find the transformation between workpiece coordinate system and CMM coordinate system and apply it for the coordinates of the characteristic points, fill the proper fields in the characteristics' dialog boxes. Particular advantage of the software is the fact that all workpieces and the corresponding characteristics are saved in a data-base and to re-evaluate the measurement uncertainty after CMM calibration can be done by single mouse click.

**Keywords:** measurement uncertainty, coordinate measuring technique, geometrical tolerances

#### dr hab. inż. Władysław Jakubiec, prof. ATH

Profesor w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, jest kierownikiem Laboratorium Metrologii. Ścisłe współpracuje z przemysłem, szczególnie w zakresie projektowania procesu pomiarowego i oceny niepewności pomiaru dla współrzędnościowej techniki pomiarowej. Uczestniczy w pracach normalizacyjnych PKN. Brał czynny udział w kilku projektach europejskich. Był kierownikiem 2 grantów KBN.

e-mail: [wjakubiec@ath.bielsko.pl](mailto:wjakubiec@ath.bielsko.pl)



#### dr inż. Wojciech Płowucha

Adiunkt w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. W 2002 r. pracował w PTB Braunschweig przy projekcie dotyczącym pomiarów powierzchni swobodnych. Główne zainteresowania naukowe to pomiary powierzchni swobodnych, pomiary optyczne i pomiary gwintów. Brał aktywny udział w czterech projektach europejskich (w tym w jednym jako koordynator) dotyczących nauczania metrologii.

e-mail: [wplowucha@ath.bielsko.pl](mailto:wplowucha@ath.bielsko.pl)



#### dr inż. Marcin Starczak

Adiunkt w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Jego zainteresowania naukowe dotyczą metrologii wielkości geometrycznych, zwłaszcza w zakresie współrzędnościowej techniki pomiarowej, specyfikacji geometrycznej wyrobów i systemów zarządzania jakością. Uzyskał m.in. nagrodę zespołową Ministra Edukacji Narodowej i Sportu oraz nagrodę zespołową Ministra Gospodarki. Jest ekspertem PKN KT 48.

e-mail: [mstarczak@ath.bielsko.pl](mailto:mstarczak@ath.bielsko.pl)



#### Jarosław Wieczorek

Od 25 lat pracuje w laboratorium metrologicznym w fabryce FIAT Powertrain w Bielsku-Białej (dawniej FSM i FIAT). W 2008 r. pracował przez 6 miesięcy w fabryce TATA MOTORS (Indie) jako ekspert i trener. Zajmuje się nadzorem pracy laboratorium długości i kąta. Ma bardzo duże doświadczenie metrologiczne: wykonuje pomiary na maszynie współrzędnościowej (Leitz, Zeiss), pomiary odchyłek kształtu (Taylor Hobson) oraz chropowatości i zarysu powierzchni.

e-mail: [jaroslaw.wieczorek@fptpowertrain.com](mailto:jaroslaw.wieczorek@fptpowertrain.com)



#### mgr inż. Jarosław Szymanek

Od 18 lat jest szefem Działu Zapewnienia Jakości i jednocześnie Pełnomocnikiem ds. Systemów Zarządzania (ISO 9001, ISO 14001, AS 9100, PN-EN ISO/IEC 17025) oraz Kierownikiem Laboratorium (akredytacja PCA nr AB 701) w „ANGA” Uszczelnienia Mechaniczne Sp. z o.o. Ma bardzo duże doświadczenie metrologiczne w zakresie pomiarów współrzędnościowych oraz chropowatości i zarysu powierzchni.

e-mail: [iszzymanek@anqa.com.pl](mailto:iszzymanek@anqa.com.pl)

