

## Eugeniusz RATAJCZYK

WYŻSZA SZKOŁA EKOLOGII I ZARZĄDZANIA W WARSZAWIE, WYDZIAŁ ZARZĄDZANIA,  
ul. Olszewska 12, 00-792 Warszawa

# Tomografy przemysłowe CT – rodzaje, parametry, zastosowania, testy dokładności

Prof. dr inż. Eugeniusz RATAJCZYK



Profesor zwyczajny związany z Politechniką Warszawską (Wydział Mechatroniki, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej oraz z Wyższą Szkołą Ekologii i Zarządzania w Warszawie. Wieleletni przewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, od IX.2008 roku honorowy przewodniczący. Uprawiana dyscyplina: Metrologia interdyscyplinarna i techniczna współzależnościowa technika pomiarowa, maszyny i roboty pomiarowe, sensory i sondy pomiarowe, tomografia przemysłowa.

e-mail: erat33@interia.pl

### Streszczenie

Wyjaśniono zasadę budowy i działania tomografu komputerowego CT-wyszczególniono główne zespoły i ich funkcje. Zamieszczono przykład tomografu i jego parametry. Pokazano możliwości pomiarowe tomografów, a na końcu zaprezentowano parametry charakteryzujące dokładność podając przykład wyznaczenia dokładności tomografu METROTOM za pomocą specjalnie zbudowanego wzorca.

**Słowa kluczowe:** tomograf komputerowy CT, lampa rtg, model CAD, inżynieria odwrotna.

## CT industrial tomographs - parameters, applications, test accuracy

### Abstract

The principle of construction and operation of a CT scanner is explained. Major units and their functions are specified. The construction and operation of an X-ray tube as well as the positioning system associated with mounting of a measured object are described. The principle of construction and operation of a matrix (panel) of detectors is explained. Examples of scanners and their parameters are included. Measurement capabilities of tomographs, including options such as standard geometry of dimensions with respect to the CAD model or reverse engineering if the CAD model is not available, are shown. Also the possibility to capture material discontinuities, inclusions of impurities, bubbles, in terms of the so-called defectoscopy, is shown. Finally, the parameters characterizing the accuracy are presented. These parameters include: the parameter associated with the error of the length measurement - E, the parameters associated with the scanning error - PF, PS, the parameters defining the dimensions and material dependencies - GS, GF, GG, the parameter specifying the resolution - Dg. The parameters associated with the error of the length measurement are explained based on the accuracy verification for a METROTOM tomograph with the use of a specially built artefact.

**Keywords:** CT computer tomography, X-ray tube, CAD model, reverse engineering, accuracy tests.

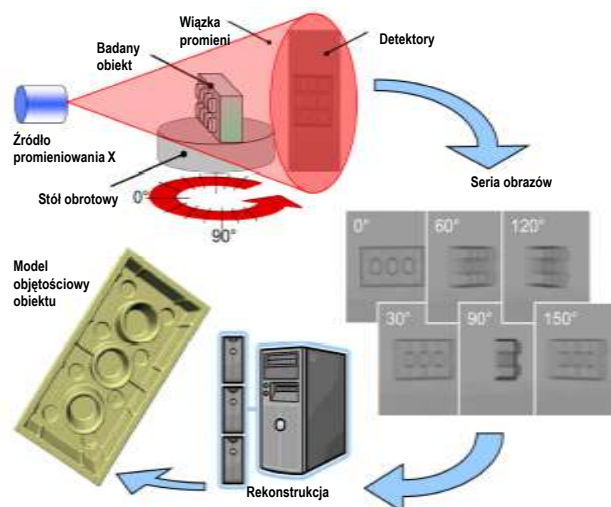
## 1. Wprowadzenie

Dotychczas tomografia komputerowa CT znana była z zastosowań medycznych, której współtwórcami byli Allan MacLeod Cormack i Godfrwey Newbold Hounsfield, którzy w roku 1979 otrzymali nagrodę Nobla. W ostatnich latach zaczęła się rozwijać tomografia CT do zastosowań przemysłowych.

W artykule wyjaśniona zostanie istota pomiarów tomograficznych, budowa tomografów - główne zespoły i ich funkcje. Zaprezentowane zostaną przykłady tomografów przemysłowych- ich parametry i funkcje metrologiczne i na końcu parametry charakteryzujące ich dokładność.

## 2. Główne zespoły tomografów i ich funkcje

Na rysunku 1 przedstawiono schemat działania tomografu, na którym pokazano przebieg wiązki rtg generowanej przez lampę, mierzony przedmiot przemieszczany liniowo i kątowno oraz detektor promieniowania w postaci matrycy.



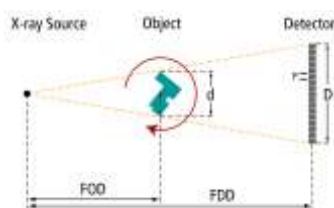
Rys. 1. Schemat działania tomografu przemysłowego  
Fig. 1. Scheme of operation of a computer tomograph

Do głównych zespołów tomografu zalicza się lampa rentgenowska i jej zasilacz, układ pozycjonujący mierzony element zwykle składający się z obrotowego stołu pomiarowego i prowadnicy liniowej oraz z systemu detektorów w postaci matrycy (panelu) [5, 6, 7].

Dokładność odwzorowania zależy od liczby projekcji wykonanych dla pełnego obrotu detalu (minimum cztery na każdy stopień obrotu). W ten sposób mając obrazy projekcji dla wielu przekrojów elementu dokonuje się rekonstrukcji obrazu całego elementu za pomocą transformaty Radona [2, 3]. Pozwala ona na odtworzenie obrazu trójwymiarowego obiektu z wielu rzutów tego przedmiotu. Metoda ta jest obecnie najczęściej stosowana w przemysłowej tomografii komputerowej ze względu na szybkość rekonstrukcji obrazu, oraz prostszą konstrukcję układu. Rozwiązanie to jest stosowane w sytuacjach, gdzie czas jest wartością krytyczną.

Jednostką obrazu przestrzennego 3D jest **voxel** – volumetric element (odpowiednik piksela dla obrazu 2D), któremu odpowiada średnica przedmiotu  $d$  podzielona przez liczbę pikseli  $N$  ( $V=d/N$ ).

Rozmiar voxela może być scharakteryzowany w nawiązaniu do piksela  $P$  i powiększenia  $M$  jako iloraz  $V=P/M$ , gdzie:  $M = FDD/FOD$  (rys. 2).



Rys. 2. Niektóre parametry charakteryzujące tomografię CT  
Fig. 2. Some parameters characterizing CT tomography

Główne parametry detektorów promieniowania rentgenowskiego charakteryzowane są przez: wydajność detekcji, energetyczną zdolność rozdzielczą, stabilność pomiarów w czasie, bezwładność, rozdzielczość przestrzenną detekcji, kontrastowość obrazu, odporność na zniszczenie przez napromieniowanie i szumy własne. W większości tomografów stosowane są detektory matrycowe, które osiągają rozdzielczość 1024x1024 pikseli, co odpowiada rozdzielczości przestrzennej obrazu wynoszącej ponad miliard vokseli ( $1024^3$ ). Występują także detektory matrycowe o rozdzielczości wynoszącej 2048x2048.

**Lampa rentgenowska**, która emituje promieni X to bańka próżniowa zawierająca zatopione **elektrody**: anodę A i katodę K w postaci wolframowej spirali (w tzw. jonowej lampie rentgenowskiej bańka wypełniona jest gazem pod ciśnieniem rzędu  $10^{-3}$  Tr).

Wysokie napięcie przyłożone do elektrod przyspiesza dodatnie jony (jonowa lampa rentgenowska) lub elektrony, które odrywają się z katody (elektronowa lampa rentgenowska), cząstki te bombardując elektrodę (odpowiednio: antykatodę - jonowa lampa rentgenowska lub anodę - elektronowa lampa rentgenowska) emitują promieniowanie hamowania, będące strumieniem kwantów promieniowania X o ciągłym widmie energetycznym.

Promieniowanie hamowania powstaje w wyniku oddziaływania cząstki z polami elektrostatycznymi jąder i elektronów w materii, z której wykonana jest anoda. Elektrony zderzając się z anodą są w niej hamowane, co powoduje powstawanie promieniowania X. Jednak 99% energii elektronów jest zamieniane w ciepło - stąd konieczność chłodzenia lampy. Chłodzenie zapewnia ciecz chłodząca lub wirująca anoda. Istnieje wiele mechanizmów powstawania promieni röntgenowskich, a więc i wiele rodzajów lamp röntgenowskich - transmisyjne, gdy ma być uzyskane większe powiększenie, a typu kierunkowego gdy oczekiwana jest większa moc. Ponadto, gdy występują lampy z mikrofokusem lub nanofokusem. Lampa z mikrofokusem charakteryzuje się mniejszą minimalną odległością przedmiotu od ogniska i większym powiększeniem. Lampa z nanofokusem ma rozbudowaną soczewkę magnetyczną i zawiera przysłonę minimalizującą wielkość plamki w ognisku.

**Panel detektorów** jest oparty na przetwornikach, które zamieniają przechodzące przez obiekt promieniowanie zawierające informacje o badanym obiekcie na sygnał elektryczny, nadający się do dalszego przetwarzania. System detekcji może składać się z pojedynczego elementu skanującego, liniowego układu elementów lub powierzchniowego układu elementów skanujących. Jest to bardzo ważny element układów stosowanych w pomiarach tomograficznych, ponieważ od detektorów w dużym stopniu zależy jakość obrazu badanego obiektu, czas projekcji i wydajność pomiarów.

Działanie detektorów opiera się na różnych zjawiskach fizycznych:

- detektory oparte na jonizacji gazu,
- detektory matrycowe budowane na bazie amorficznego krzemu,
- detektory półprzewodnikowe,
- detektory scyntylacyjne,
- detektory konstruowane według technologii opartej na zastosowaniu elektrycznych lub magnetycznych zjawisk w ciałach stałych.

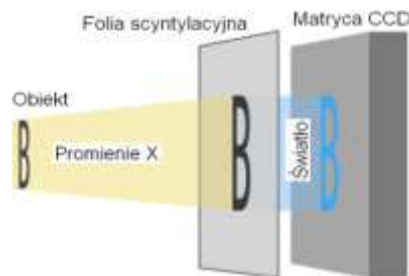
Obecnie dominują detektory scyntylacyjne, których uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 3.

Promieniowanie röntgenowskie padając na kryształ scyntylacyjny wywołują zjawisko fotoelektryczne, podczas którego fotony promieni X wybijają elektrony z orbit, te zaś zamieniane są na rozbłyski światła dalej rejestrowane przez fotodiody. Aktualnie najczęściej stosuje się dwa typy detektorów stosujące płyty z amorficznego krzemu (a-Si) i z amorficznego selenu (a-Se).

W literaturze wymienia się następujące parametry opisujące jakość pomiarów osiąganych przez różne detektory promieniowania rentgenowskiego [4]:

- wydajność detekcji,
- energetyczna zdolność rozdzielcza,
- stabilność pomiarów w czasie,

- bezwładność,
- rozdzielczość przestrzenna detekcji,
- odporność na zniszczenie przez napromieniowanie,
- kontrastowość obrazu,
- szumy własne detektorów.



Rys. 3. Uproszczony schemat matrycy detektorów  
Fig. 3. Simplified scheme of the detector array

### Przykład tomografu i jego zastosowanie

Obecnie na rynku europejskim oferowane są tomografy do zastosowań przemysłowych m.in. przez następujących producentów:

- Tomografy Metrotom produkcji firmy C.Zeiss [www.zeiss.pl],
- Tomografy z serii XT H firmy Nikon Metrology [www.nikonmetrology.com],
- Systemy tomograficzne 2D 3D firmy GE Sensing& Inspection Technologies GmbH [www.phoenix-xray.com],
- System Y.CT firmy YXLON International GmbH [www.yxlon.com].
- Tomografy firmy Wenzel Volumetrik GmbH [www.wenzel\_volumetrik.com]
- Systemy TomoScape i TomoCheck firmy Werth Messtechnik [www.werth.messtechnik.de],
- Tomografy firmy Viscom Technology [www.viscom.com],
- Tomografy firmy North Star Imaging, Inc [www.xviewct.com],
- Tomografy firmy Saki Corporation [www.sakicorp.com].

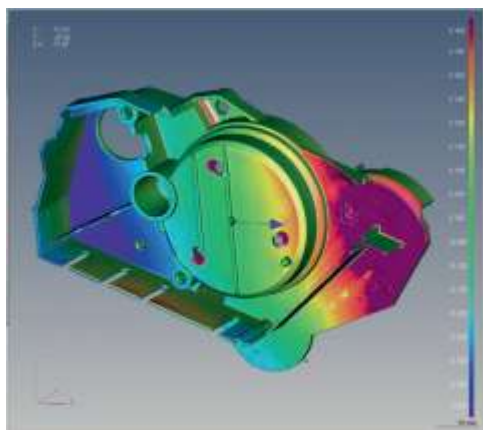
Jednym z przykładów tomografów przemysłowych jest tomograf METROTOM produkcji firmy C.Zeiss, którego widok zamieszczono na rysunku 4.

Firma C.Zeiss wytwarza dwa rodzaje tomografów METROTOM 800 i METROTOM 1500. Różnią się głównie wymiarami i tym samym wymiarami mierzonych obiektów, rodzajami lamp röntgenowskich i matrycami detektorów. METROTOM 800 wyposażony jest w lampę röntgenowską o parametrach 130KV/39W i w matryce detektorów zawierających 1900x1512 pikseli. Można badać elementy o zakresach pomiarowych  $\varnothing 150 \times 150$  mm. Drugi rodzaj tomografu METROTOM 1500 ma lampę röntgenowską o parametrach 225kV/225W, panel detektorów o 1024x124 pikseli z opcją 2014x2048 pikseli i może badać przedmioty o wymiarach  $\varnothing 300 \times 350$  mm.



Rys. 4. Widok tomografu METROTOM firmy C.Zeiss  
Fig. 4. View of the CT METROTOM of C.Zeiss company

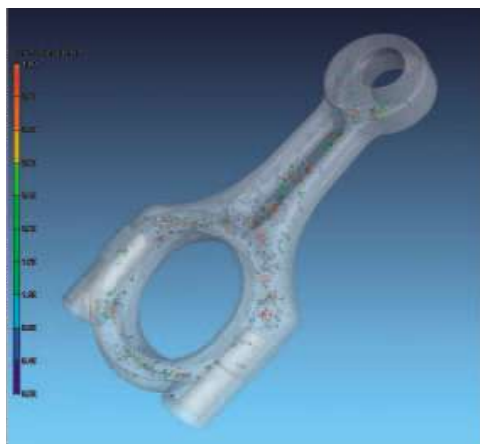
Tomografy METROTOM pozwalają na uzyskanie dwuwymiarowych i trójwymiarowych obrazów mierzonych obiektów. W przypadku obrazu trójwymiarowego można dokonać przekroju w dowolnym jego miejscu, dzięki czemu uzyskuje się wymiary wewnętrzne niemożliwe do zmierzenia konwencjonalnymi metodami. Mając trójwymiarowy model, otrzymany za pomocą pomiaru tomograficznego, system Metrotom umożliwia jego porównanie z modelem CAD. Dzięki temu można porównać te wymiary i przedstawić w postaci mapy odchyłek od wymiaru nominalnego (rys. 5).



Rys. 5. Widok mierzonego przedmiotu w porównaniu z modelem CAD  
Fig. 5. A view of the workpiece compared with the CAD model

Oprócz pomiarów geometrycznych METROTOM umożliwia wykonywanie badań również w zakresie defektoskopii w celu wykrycia nieciągłości i porowatości materiałów metalowych (rys. 6) [10]. Umożliwia również przeprowadzenie kontroli poprawności montażu różnego rodzaju elementów elektronicznych, głównie złącz elektrycznych, itp.

Każdy tomograf wyposażony jest w odpowiednie oprogramowanie. W przypadku tomografów METROTOM są to oprogramowania CALYPSO do wyznaczania wymiarów geometrycznych badanego przedmiotu; VGStudio Max do defektoskopii i Dimension do inżynierii odwrotnej. System METROTOM poprzez oprogramowanie CALYPSO umożliwia wykonywanie pomiarów części maszyn z dopuszczalnym błędem granicznym określonym zależnością  $PE_E = (4,5 + L/100) \mu\text{m}$ , gdzie L-mierzony wymiar w mm.



Rys. 6. Przykład przedmiotu z wykrytymi wadami materiału  
Fig. 6. Example of a subject with detected defects in material

#### Parametry charakteryzujące dokładność i metody ich wyznaczania

Według wytycznych VDI/VDE 2630 [9] dokładność tomografów komputerowych TC charakteryzują następujące cztery grupy parametrów:

1. Parametr związany z błędem pomiaru długości -  $E$ ,
  2. Parametry związane z błędem skanowania -  $PF$ ,  $PS$ ,
  3. Parametry określające zależności wymiarowo-materiałowe -  $GS$ ,  $GF$ ,  $GG$ ,
  4. Parametr określający rozdzielczość -  $Dg$ .
- Parametry z grupy trzech pierwszych wyznaczane są dla dwóch układów tomografów:
- a) dla 2D – płaskiej wiązki promieniowania – do parametru dodaje się  $TS$  np.  $PF(TS)$ ,
  - b) dla 3D – stożkowej wiązki promieniowania - do parametru dodaje się  $TT$ , np.  $PF(TT)$

Parametr związany z błędem pomiaru długości –  $E$

Tak jak w technice pomiarów współrzędnościowych – wg PN EN ISO 10360 [1], błąd ten wyznacza się za pomocą wzorców materialnych długości.

Wyznaczona wartość błędu  $E$  jest porównywana z granicznym dopuszczalnym błędem pomiaru długości o postaci

$$MPE_E = \pm (A + L/K) \mu\text{m}$$

gdzie: L- jest mierzona długością podaną w milimetrach.

Tak jak zaznaczono wyżej błąd  $E$  wyznaczany jest za pomocą wzorców materialnych długości, np. płytek wzorcowych, wzorców kulowych, stopniowych wzorców walcowych, wzorców o specjalnej konstrukcji, np. w postaci zestawu trzpieni pomiarowych zakończonych elementami kulistymi.

W przypadku zastosowania wzorca długości w postaci płytki wzorcowej wiązka rtg przechodzi przez całą długość wzorca jako pomiar odległości między dwoma przeciwległymi powierzchniami wyznaczając błąd  $E$  z zależności:

$$E = L_a - L_r$$

gdzie:  $L_a$  –wyznaczona z pomiaru długość płytki,  $L_r$  –wzorcowa długość płytki.

Ze względu na to, że wiązka promieniowania przechodzi przez całą długość płytki i ze względu na ograniczoną przenikalność dla materiału ze stali stosuje się płytki wzorcowe o małych długościach, najczęściej poniżej 30mm.

Ograniczeń związanych z przenikalnością w dużym stopniu pozabawione są wzorce składające się z zestawu kul. Na przykład zestawu dwóch kul, dla których wymiar wzorcowy stanowi odległość  $L_r$  między osiami kul.

Błąd  $E$  wyznacza się podobnie jak dla wzorców końcowych tj. jako różnicę między odległością wzorcową  $L_r$  a wartością uzyskaną z pomiaru  $L_a$ . Współrzędne środków kul wyznacza się po zmierzeniu każdej z kul, a wyznaczone z aproksymacji sferą na podstawie określonej liczby współrzędnych punktów zebranych na powierzchni kuli.

W przypadku zastosowania wzorców kulowych wyznaczanie pozycji środka kuli, w odróżnieniu od wyznaczania położenia powierzchni na wzorcu końcowym, polega na uśrednianiu i dopasowaniu kształtu i wymiarów. Wobec tego należy uwzględnić korekcję efektu uśredniania oraz kompensację błędów systematycznych.

Do wyznaczenia błędu  $E$  można zastosować bardziej rozbudowany wzorec z elementami kulistymi (rys. 7). Taki wzorec został opracowany w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej i użyty do sprawdzania tomografów firmy C.Zeiss [11].

Wytyczne VDI/VDE 2630 [9] stanowiące podstawę niniejszego badania dokładności tomografu METROTOM 800 przeprowadzono za pomocą wzorca pokazanego na rysunku 7 opracowanego i badanego przez Monikę Olejnik i Tomasza Kowaluka przy współudziale autora. Wzorec został wykonany z dwóch komponentów – podstawy wykonanej ze stali S235 oraz zestawu 13 trzpieni pomiarowych wykonanych z ceramiki z rubinowymi końcówkami pomiarowymi o średnicy 5mm każda. Trzpień

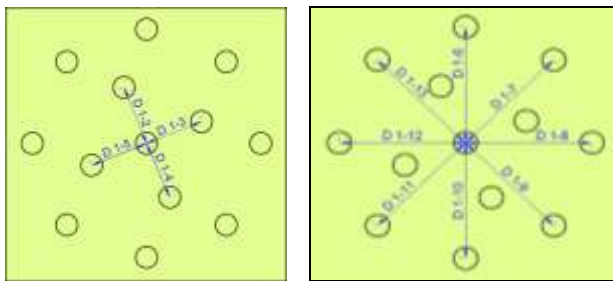


z końcówkami kulistymi znajdują się na trzech wysokościach, a jeden trzpień został konstrukcyjnie pochylony w celu możliwości rozpoznania kul na obrazie tomografu.



Rys. 7. Widok wzorca przestrzennego z elementami kulistymi  
Fig. 7. View of the spatial pattern with spherical elements

Wzorec pozwala wyznaczyć 12 odległości między osiami poszczególnych kul względem osi kuli środkowej wg schematu pokazanego na rys. 8.



Rys. 8. Schemat wymiarów między osiami kul wzorcowych  
Fig. 8. Scheme of the dimensions between the axes of reference spheres

W celu zapewnienia powtarzalności zbierania punktów pomiarowych podczas wzorcowania w pierwszej kolejności wykonano pomiary wzorca na maszynie współrzędnościowej ACCURA 7 [1]. Na podstawie uzyskanych wyników z serii 30 pomiarów zbudowano model CAD wzorca.

Pomiary wszystkich kul na tomografie METROTOM wykonano w trybie skaningowym z prędkością 2,5 mm/s poprzez skanowanie czterech torów kołowych i dwóch łuków przechodzących przez biegum w płaszczyznach prostopadłych do siebie. Układ bazowy został wyznaczony metodą PLP (płaszczyzna-linia-punkt) analogicznie jak przy pomiarze na maszynie ACCURA.

Tab. 1. Wyniki pomiaru wzorca na tomografie METROTOM  
Tab. 1. Measurement results of a standard from METROTOM tomography

Lp.	Wymiar	Średnia mm	Rozstęp μm	Odchylenie standardowe μm
1.	D 1-2	14,0501	0,6	0,15
2.	D 1-3	13,8044	2,5	0,72
3.	D 1-4	13,9216	0,3	0,09
4.	D 1-5	13,9352	2,5	0,73
5.	D 1-6	26,4771	2,0	0,53
6.	D 1-7	26,4819	1,4	0,27
7.	D 1-8	26,5403	3,2	1,01
8.	D 1-9	26,5985	1,6	0,47
9.	D 1-10	26,5956	1,0	0,3
10.	D 1-11	26,5960	3,9	1,34
11.	D 1-12	26,6177	1,7	0,39
12.	D 1-13	26,5195	2,2	0,67

Wyniki pomiarów na tomografie przedstawiono w tabelicy 1 podając wartości średnie dla każdej z 12 odległości z 30 pomiarów każdej odległości. Podano wartości rozstępu i odchylenia średnio kwadratowego.

Graniczny błąd dopuszczalny wyznaczenia wymiaru długości tomografu Metrotom 800 określony jest następującym wzorem

$$MPE_E = \pm(4,5 + L/100) \mu\text{m}$$

gdzie: L mierzona długość w mm.

Dla wymiaru pierwszej grupy tj. od D 1-3 do D 1-5 wynoszącego ok. 14 mm wartość dopuszczalna błędu wynosi  $MPE_E = 4,64 \mu\text{m}$ , a dla drugiej grupy wymiarów tj. od D 1-6 do D 1-13 wartość dopuszczalna błędu wynosi  $MPE_E = 4,765 \mu\text{m}$ . Tak więc uzyskane z pomiaru wartości błędów średnich kwadratowych mieszczą się w dopuszczalnych wartościach błędów podanych przez producenta tomografu, bowiem największa wartość błędu dla pierwszej grupy wynosi  $E_1 = 0,73 \mu\text{m}$ , a dla drugiej  $E_2 = 1,34 \mu\text{m}$ .

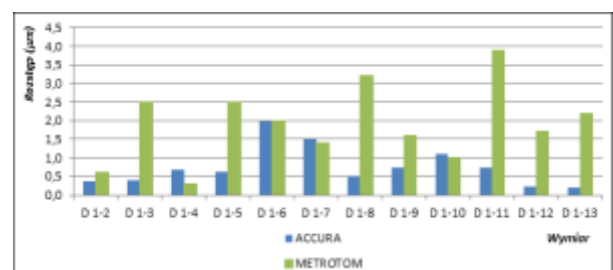
Porównanie wyników wartości średnich z serii 30 pomiarów każdego odcinka z podaniem różnic między nimi przedstawiono w tabelicy 2.

Tab. 2. Różnice między wynikami średnimi pomiarów odległości D na tomografie i na maszynie Accura

Tab. 2. Differences between the measurement average results of distance D obtained from tomography and Accura machine

Lp	Wymiar	Accura, mm	Tomograf, mm	Różnica, mm
	1	2	3	2-3
1.	D 1-2	14,0492	14,0501	0,98
2.	D 1-3	13,8040	13,8044	0,36
3.	D 1-4	13,9211	13,9216	0,51
4.	D 1-5	13,9351	13,9352	0,10
5.	D 1-6	26,4776	26,4771	0,51
6.	D 1-7	26,4825	26,4819	0,64
7.	D 1-8	26,5398	26,5403	0,40
8.	D 1-9	26,5982	26,5985	0,28
9.	D 1-10	26,5946	26,5956	0,97
10.	D 1-11	26,5960	26,5960	0,00
11.	D 1-12	26,6181	26,6177	0,45
12.	D 1-13	26,5192	26,5195	0,26

Największą różnicę między średnimi wynikami otrzymano dla pomiaru odległości D 1-2 (0,98 μm). Jest to prawdopodobnie spowodowane naciskiem końcówki pomiarowej na element podczas pomiarów na maszynie ACCURA. Nacisk ten wpływa na ugięcie pochylonego trzpienia, na którym znajduje się kula 2. Na maszynie wzorec był mierzony stykowo, natomiast na tomografie skaningowo. Najmniejsza różnica wymiarów wynoszące 0,04 μm uzyskano przy pomiarze odległości D 1-11.



Rys. 9. Histogram wartości rozstępu wyników pomiaru na maszynie ACCURA i tomografie METROTOM

Fig. 9. Histogram of scatter of the measurement results from the machine ACCURA and METROTOM tomography

Na rysunku 9 przedstawiono w postaci histogramu wartości rozstępów, traktowane jako różnice między maksymalną i minimalną wartością. W większości przypadków wartości rozstępu wyników z tomografu przewyższają wartości z maszyny współrzędnościowej, co potwierdza znany fakt, że maszyna jest z założenia dokładniejsza, co wynika z zależności błędu dopuszczalnego wyrażonego zależnością

$$MPE_E = \pm(1,7 + L/333) \mu\text{m}$$

Bowiem dla maksymalnej odległości z serii D 1-6 do D 1-13 tj. 26 mm błąd dopuszczalny wynosi 1,778  $\mu\text{m}$ , gdy dla tomografu wynosi on 4,76  $\mu\text{m}$ .

Wartość rozstępu, jako miara rozrzutu uzyskanych wartości przy pomiarach tomografem METROTOM 800, nie przekracza 3,8  $\mu\text{m}$  natomiast wartości odchyłeń standardowych zawierają się w przedziale 0,15 - 1,34  $\mu\text{m}$ . Różnice między wartościami rozstępu dla obu urządzeń przedstawia histogram na rysunku 9.

Różnice pomiędzy wynikami pomiarów mierzonej odległości od D 1-2 do D 1-13 uzyskanych za pomocą maszyny współrzędnościowej ACCURA, jako maszyny referencyjnej, zawierają się w przedziale od 0,04  $\mu\text{m}$  do 0,98  $\mu\text{m}$ .

Dla potwierdzenia istotności zaobserwowanych różnic przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników przy pomocy programu Statgraphics Centurion XVI. W pierwszym etapie usunięto wyniki pomiarów odbiegających pod względem statystycznym od całej serii przy pomocy wykresów „Box and Whisker”. Następnie potwierdzono normalność rozkładów przy pomocy testów Shaphiro-Wilks, Skośności oraz Kurtozy.

Występowanie statystycznych różnic pomiędzy wynikami pomiarów z maszyny współrzędnościowej ACCURA a tomografem METROTOM 800 sprawdzono przy pomocy trzech testów: testu t w celu porównania wartości średnich, testu F w celu porównania odchyłeń standardowych oraz testu w celu porównania median. Wyniki testów wykazały istotne statystyczne różnice pomiędzy uzyskanymi wynikami na poziomie ufności wynoszącym 95%. Wyniki testów są zgodne z wnioskami wynikającymi z porównania uzyskanych wartości statystycznych.

### 3. Literatura

- [1] Ratajczyk E., Współrzędnościowa Technika Pomiarowa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa (2005).
- [2] Jezierski G.: Radiografia przemysłowa. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa (1993).
- [3] Cierniak R.: Tomografia komputerowa. Budowa urządzeń CT. Algoritmy rekonstrukcyjne. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2005.
- [4] Kielczyk J.: Radiografia przemysłowa. Wydawnictwo Gamma. Warszawa 2006.
- [5] Ratajczyk E.: Tomografia komputerowa w pomiarach geometrycznych 3D. Pomiary Automatyka Kontrola PAK vol. 57, nr 2/2011. 220-223.
- [6] Ratajczyk E.: Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Mechanik nr 2/2011, s.112-117; nr 3/2011, s.226-231; nr 4/2011 s.326-331.
- [7] Hiller J., Kasperl S., Hilpert U., Bartscher M.: Coordinate Measuring with Industrial X-Ray Computed Tomography. Technisches Messen Vol.74, No.11, pp.553-564, 2007.
- [8] Ryniewicz A: Accuracy assessment of shape mapping using Computer Tomography. Metrology and Measuring Systems. Quarterly of Polish Academy of Sciences. Vol.XVII, No.3/2010.482-491.
- [9] VDI/VDE 2630. Blatt 1.3: Computertomografie in der dimensionalen Messtechnik. Düsseldorf 2009.
- [10] Kowaluk T., Woźniak A.: Study of porosity measurement using the computer tomograph. Pomiary Automatyka Robotyka (PAR) nr 12/2012.s. 82-86.
- [11] Kowaluk T., Ratajczyk E.: Dokładność tomografów przemysłowych CT w wyznaczaniu wymiarów geometrycznych. Pomiary Automatyka Kontrola. Vol.59, nr 5(2013). 462-465.

otrzymano / received: 25.06.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2014

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

### Informacje dla Autorów

Redakcja przyjmuje do publikacji tylko prace oryginalne, nie publikowane wcześniej w innych czasopismach. Redakcja nie zwraca materiałów nie zamówionych oraz zastrzega sobie prawo redagowania i skracania tekstów oraz streszczeń.

Artykuły naukowe publikowane w czasopiśmie PAK są formatowane jednolicie zgodnie z ustaloną formatką zamieszczoną na stronie redakcyjnej [www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl). Dlatego artykuły przekazywane redakcji należy przygotowywać w edytorze Microsoft Word 2003 (w formacie DOC) z zachowaniem:

- wielkości czcionek,
- odstępów między wierszami tekstu,
- odstępów przed i po rysunkach, wzorach i tabelach,
- oznaczeń we wzorach, tabelach i na rysunkach zgodnych z oznaczeniami w tekście,
- układu poszczególnych elementów na stronie.

Osobno należy przygotować w pliku w formacie DOC notki biograficzne autorów o objętości nie przekraczającej 450 znaków, zawierające podstawowe dane charakteryzujące działalność naukową, tytuły naukowe i zawodowe, miejsce pracy i zajmowane stanowiska, informacje o uprawianej dziedzinie, adres e-mail oraz aktualne zdjęcie autora o rozmiarze 3,8 x 2,7 cm zapisane w skali odcieni szarości lub dołączone w osobnym pliku (w formacie TIF).

Wszystkie materiały:

- artykuł (w formacie DOC),
- notki biograficzne autorów (w formacie DOC),
- zdjęcia i rysunki (w formacie TIF lub CDR),

prosimy przesyłać w formie plików oraz dodatkowo jako wydruki na białym papierze (lub w formacie PDF) na adres e-mail: [wydawnictwo@pak.info.pl](mailto:wydawnictwo@pak.info.pl) lub pocztą zwykłą, na adres: Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola, Asystent Redaktora Naczelnego mgr Agnieszka Skórkowska, ul. Akademicka 10, p.21A, 44-100 Gliwice.

Wszystkie artykuły naukowe są dopuszczane do publikacji w czasopiśmie PAK po otrzymaniu pozytywnej recenzji. Autorzy materiałów nadesłanych do publikacji są odpowiedzialni za przestrzeganie prawa autorskiego. Zarówno treść pracy, jak i wykorzystane w niej ilustracje oraz tabele powinny stanowić dorobek własny Autora lub muszą być opisane zgodnie z zasadami cytowania, z powołaniem się na źródło cytatu.

Przedrukowywanie materiałów lub ich fragmentów wymaga pisemnej zgody redakcji. Redakcja ma prawo do korzystania z utworu, rozporządzania nim i udostępniania dowolną techniką, w tym też elektroniczną oraz ma prawo do rozpowszechniania go dowolnymi kanałami dystrybucyjnymi.