

Tomasz KOWALUK, Adam WOŹNIAKPOLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHATRONIKI, INSTYTUT METROLOGII I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ
ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa**Badanie stabilności temperatury mierzonego elementu podczas pomiarów tomograficznych****Mgr inż. Tomasz KOWALUK**

Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 2011. Obecnie doktorant w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Obszar zainteresowań naukowych - przemysłowa tomografia komputerowa, współrzędnościowe techniki pomiarowe.



e-mail: t.kowaluk@mchtr.pw.edu.pl

Dr hab. inż. Adam WOŹNIAK

Profesor nadzwyczajny i dyrektor Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Tytuł doktora habilitowanego uzyskał w roku 2011. Głównie zainteresowania naukowe autora są dotyczyć zaawansowanych technik pomiarów wielkości geometrycznych, a w szczególności współrzędnościowej techniki pomiarowej. Autor 89 publikacji w krajowych i zagranicznych czasopiśmie naukowych oraz materiałach konferencyjnych, w tym 18 w czasopiśmie z listy filadelfijskiej.



e-mail: a.wozniak@mchtr.pw.edu.pl

Streszczenie

Przemysłowa tomografia komputerowa jest stosunkowo młodą i rozwijającą się gałęzią pomiarów współrzędnościowych. Prowadzonych jest wiele badań dokładności pomiarów tomograficznych. W badaniach nad dokładnością, rozdzielczością pomiarów duży nacisk kładziony jest na konstrukcję wzorców. Jednak w większości przypadków nie jest rozważany wpływ stabilności temperaturowej na wynik pomiarów. Producenci podając dokładność tomografów podają również parametry środowiskowe, dla jakich dokładność ta jest zachowana wraz z zakresem temperatury, w jakim należy wykonać pomiar. Podczas generowania promieniowania rentgenowskiego 99% energii zamieniana jest na ciepło, z tego względu niezbędne jest zapewnienie odpowiedniego chłodzenia lampy. W artykule sprawdzono wpływ ustawienia parametrów pomiarowych na zmianę temperatury mierzonego przedmiotu. Zweryfikowano wpływ ustawionego powiększenia - wielkości voxela (odległość mierzonego elementu od lampy rentgenowskiej) na zmianę temperatury. Dodatkowo sprawdzono wpływ ustawień lampy rentgenowskiej (wartość pobieranej mocy, natężenie i napięcie zasilania) na stabilność temperatury podczas pomiarów. Badania zostały wykonane na przemysłowym tomografie komputerowym METROTOM 800. Zmiany temperatury zostały zmierzone przy pomocy rejestratora MicroLite 5016A.

Słowa kluczowe: tomografia komputerowa, stabilność temperatury.

The study of the measured element temperature stability during tomographic measurements**Abstract**

Industrial computed tomography is a relatively new and growing sector of coordinate measurements. Many studies are conducted on the accuracy of tomographic measurements. In studies on the accuracy and resolution of measurement a large emphasis is put on design of gauges. However, in most cases, influence of the temperature stability on the measurement result is not considered. Manufacturers when giving the accuracy of CT scanners also provide environmental parameters for which the accuracy is maintained together with the temperature range in which measurements should be made. When generating X-ray radiation 99% of energy is converted into heat, therefore it is necessary to ensure the adequate cooling of an X-ray tube. This paper presents influence of the heat emitted by the X-ray tube and the radiation power on the change of the measured object temperature. The temperature stability during the measurements was checked. The influence of the magnification settings (Voxel size - a distance between the measured element and the X-ray tube) for temperature change was verified. The tests were performed on an industrial computer tomograph METROTOM 800. The temperature changes were measured with use of the logger Microlite 5016A.

Keywords: computer tomography, temperature stability.

1. Wstęp

Obecnie dominującą techniką pomiarową w dokładnych pomiarach geometrycznych jest technika współrzędnościowa.

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe to przyrządy w pełni skomputeryzowane, zarówno w odniesieniu do przetwarzania wyników pomiarów do wymaganej postaci, jak i w zakresie sterowania czynnościami pomiarowymi [1]. Do technik współrzędnościowych możemy również zaliczyć względnie nową technikę pomiarową jaką jest przemysłowa tomografia komputerowa.

Tomografia komputerowa CT coraz częściej znajduje zastosowanie nie tylko w medycynie czy lotnictwie ale również w różnorodnych gałęziach przemysłu. Rozwój technik wytwarzania urządzeń precyzyjny wymaga stosowania coraz dokładniejszych urządzeń do pomiarów gotowych wyrobów. Oprócz coraz bardziej restrykcyjnych wymogów dotyczących wymiarów zewnętrznych kładzie się nacisk na strukturę wewnętrzną detalu. Dzięki tomografom komputerowym istnieje możliwość pomiaru wielkości nieosiągalnych przez inny sprzęt metrologiczny. Tomografy używane są do badań nieniszczących obiektów wykonanych z różnych materiałów, takich jak metale, ceramika, tworzywa sztuczne. Pomiar elementów o złożonej budowie, defektoskopia, analiza materiałowa czy inżynieria odwrotna. Są to zadania, które bez problemu realizowane są za pomocą tomografu komputerowego. Ze względu na nowoczesność tego rodzaju sprzętu i nieznaną jego dokładnych właściwości metrologicznych konieczne jest zbadanie wpływu poszczególnych składowych na dokładność pomiaru [2].

Przemysłowa tomografia komputerowa CT jest szybko rozwijającą się gałęzią pomiarów współrzędnościowych. Prowadzone są liczne badania nad konstrukcją wzorców umożliwiających ocenę dokładności pomiarów geometrycznych, wyliczania objętości wad wewnętrznych takich jak np. porowatość [3]. Sprawdzany jest próg wykrywania wad oraz prowadzone są badania nad rozdzielczością pomiarów tomograficznych [4]. Prowadzone są próby modelowania błędów pomiarów tomograficznych. Dokładność pomiarów tomograficznych zależy od wielu czynników takich jak typ materiału, ilość materiałów z jakich wykonany jest mierzony element, parametrów lampy rentgenowskiej (napięcia i natężenia zasilania), ustawień detektora, czasu naświetlania elementu, ustawionej liczby projekcji na pełny obrót czy warunków środowiskowych. W literaturze opisanych jest wiele badań nad wpływem stabilności temperatury na zmianę wymiarów podczas pomiarów na współrzędnościowych maszynach pomiarowych [5] nie można jednak porównać uzyskanych rezultatów do techniki tomograficznej.

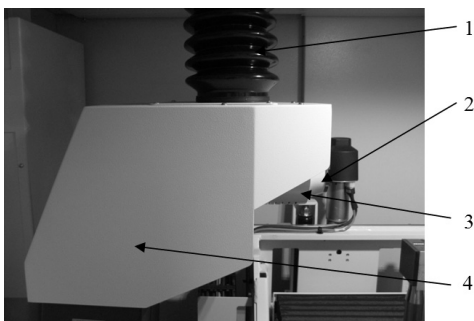
2. Czynniki wpływające na stabilność temperatury

Z warunków środowiskowych największy wpływ na wyniki pomiarów geometrycznych ma temperatura. Stabilność temperatury mierzonego elementu zależy przede wszystkim od parametrów lampy rentgenowskiej i systemu jej chłodzenia. Mierzony element podczas pomiaru nagrzewa się w skutek oddziaływania promieniowania rentgenowskiego, dodatkowo absorbuje ciepło

wydzielane przez lampę rentgenowską. Lampa rentgenowska zbudowana jest z próżniowej bańki posiadającej zatopione elektrody: anodę i katodę 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. 99% energii elektronów jest zamieniane w ciepło - stąd konieczność chłodzenia lampy [1]. W zależności od konstrukcji lampy rentgenowskiej stosowane jest chłodzenie cieczą lub powietrzem.

3. Lampa rentgenowska tomografu METROTOM 800

Przemysłowy tomograf komputerowy METROTOM 800 wyposażony jest w stałą lampę rentgenowską typu zamkniętego (nie wymienne włókno wolframowe) przedstawioną na rys. 1.



Rys. 1. Widok lampy rentgenowskiej CT METROTOM 800
Fig. 1. View of the X-ray tube of CT METROTOM 800

Lampa rentgenowska składa się z systemu powietrznego chłodzenia 1, płyty kolimatora z uchwytem na filtr 2, anody i katody 3 oraz generatora wysokiego napięcia 4. Maksymalne napięcie pracy wynosi 130 kV, maksymalne natężenie 300 μ A (moc 39 W). Z zależności od mierzonego przedmiotu możliwa jest zmiana charakterystyki wiązki promieniowania za pomocą filtrów (możliwość stosowania filtrów miedzianych i aluminiowych o grubości od 0,25 do 2 mm) [6].

W zależności od ustawionej wartości mocy lampy zmienia się średnica wiązki promieniowania w ognisku. Zestawienie rozmiaru średnicy wiązki promieniowania w ognisku w zależności od mocy lampy przedstawia tab. 1.

Tab. 1. Średnica wiązki promieniowania w ognisku w zależności od mocy lampy rentgenowskiej

Tab. 1. Focal spot size depending on the X-ray tube power

Moc, W	Średnica wiązki promieniowania w ognisku, μ m
Do 4	5
4-8	8
8-16	20
16-39	40

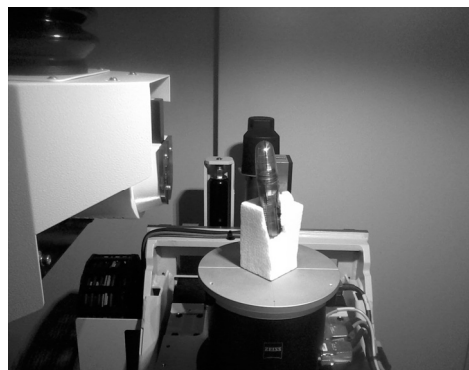
Średnica wiązki promieniowania w ognisku jest ważnym parametrem podczas ustawiania powiększenia mierzonego elementu (odległości elementu od lampy rentgenowskiej). W przypadku, gdy ustawiona wielkość pojedynczego piksela/woksele jest mniejsza od średnicy wiązki promieniowania w ognisku na rekonstrukcji otrzymywane są dodatkowe szumy, rozszerzenie krawędzi.

Aby tego uniknąć należy podczas pomiaru dobierać moc lampy tak, by wartość średnicy wiązki promieniowania w ognisku była mniejsza od wielkości pojedynczego piksela/woksele. W przypadku gdy moc lampy rentgenowskiej jest zbyt niska aby prześwietlić mierzony obiekt należy zwiększyć czas integracji oraz wzmocnienie detektora.

4. Projekt procedury badawczej

Stabilność temperatury mierzonego elementu podczas pomiaru zależna jest głównie od dwóch czynników: od ustawionej mocy lampy oraz odległości mierzonego elementu od lampy rentgenowskiej. W doświadczeniu sprawdzono wpływ ustawionej odległości mierzonego elementu od lampy oraz wpływ ustawionej mocy lampy. Badania przeprowadzono na przemysłowym tomografie komputerowym METROTOM 800 znajdującym się na wyposażeniu Laboratorium Zaawansowanych Technik Pomiarów Geometrycznych Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Zmiany temperatury podczas pomiarów zostały zarejestrowane przy pomocy rejestratora MicroLite 5016A.

Rejestrator charakteryzuje się dokładnością pomiaru wynoszącą $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$; zakresem pomiarowym od -40 do $+80^{\circ}\text{C}$, okresem między zapisami od 1 s i pamięcią do 16000 zapisów. Rejestrator został zaprogramowany na rejestrację z krokiem co 10 s, ustawiono start rejestracji od godziny 14. W celu ustabilizowania temperatury rejestrator został umieszczony na stole obrotowym tomografu 6 godzin przed rozpoczęciem pracy (rys. 2).



Rys. 4. Widok rejestratora temperatury zamontowanego na stole obrotowym CT METROTOM 800

Fig. 4. View of the temperature logger mounted on the rotary table CT METROTOM 800

Tab. 2. Zestawienie parametrów pomiarowych

Tab. 2. Summary of measurement parameters

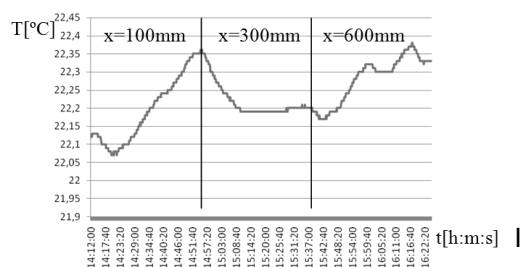
Lp.	Pozycja w osi x, mm	Napięcie, kV	Natężenie, μ A	Moc, W
1	100	100	160	16
2	300	100	160	16
3	600	100	160	16
4	115	130	30	4
5	115	130	61	8
6	115	130	123	16
7	115	130	300	40

Przeprowadzono serię siedmiu pomiarów rejestratora na tomografie komputerowym (rejestrator traktowany jako przedmiot mierzony - rejestracja temperatury mierzonego obiektu): trzykrotny pomiar przy jednakowej mocy lampy dla trzech różnych odległości od lampy rentgenowskiej oraz czterokrotny pomiar w określonej odległości od lampy rentgenowskiej przy czterech różnych ustawieniach mocy lampy rentgenowskiej. Dla każdego z pomiarów wiązka promieniowania rentgenowskiego została skupiona na rejestratorze, ustawiono identyczną liczbę projekcji na obrót wynoszącą 1000 (im większa liczba projekcji tym dokładniejsza

rekonstrukcja mierzonego obiektu) [7] i identyczny czas integracji wynoszący 1 s. Zestawienie parametrów pomiarowych dla poszczególnych pomiarów przedstawia tab. 2.

5. Wyniki pomiarów, wnioski

Uzyskane wyniki pomiarów podzielono na dwie grupy. W pierwszej kolejności przeanalizowano wpływ odległości mierzonego elementu od lampy rentgenowskiej. Wyniki w postaci wykresu przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Wykres zmienności temperatury od czasu w funkcji odległości od lampy rentgenowskiej

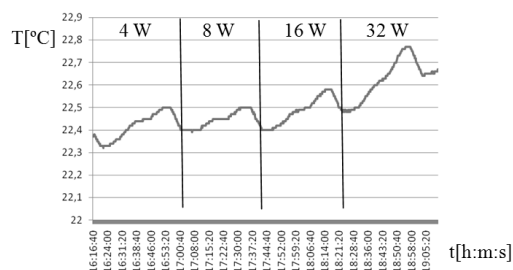
Fig. 5. The temperature variability vs. time for different distance of the X-ray tube

Analiza wykresu wykazała początkowy spadek temperatury. Jest to spowodowane faktem, iż podczas ustawiania parametrów dla siedmiu kolejnych pomiarów temperatura mierzonego rejestratora została podwyższona. Przed rozpoczęciem właściwego pomiaru wykonywanych jest 80 projekcji rozgrzewających lampę do ustawionej moc pomiarowej, w tym czasie lampa wydziela mniej ciepła a zarejestrowana temperatura jest niższa. W chwili startu właściwego pomiaru oddziaływanie promieniowania jak i ciepło wydzielane przez lampę wpłynęło na wzrost temperatury rejestratora do 22,35°C. W chwili zakończenia pomiaru następuje wyłączenie lampy rentgenowskiej i rozpoczyna się proces rekonstrukcji danych. Po obliczeniu objętościowego pliku następuje rozpoczęcie kolejnego pomiaru w odległości 300 mm od lampy. Na wykresie zauważalne jest zatrzymanie temperatury na stałej wartości poniżej 22,2°C. Powodem takiej sytuacji może być nierównomierne rozłożenie temperatury wewnątrz komory tomografu. Najwyższa temperatura występuje w bezpośrednim otoczeniu lampy rentgenowskiej, podczas trwania powietrze w komorze magrzewa się w funkcji odległości od źródła ciepła. Przy odległości od lampy wynoszącej 600 mm widoczny jest na wykresie ponowny wzrost temperatury. Spowodowane może być to faktem wyrównania temperatury wewnątrz komory tomografu, co świadczy o nierównomiernym rozkładzie temperatury w przestrzeni pomiarowej tomografu.

Kolejnym etapem badań było sprawdzenie wpływu ustawionej mocy lampy rentgenowskiej na stabilność temperatury mierzonego przedmiotu. W tym celu wykonano czterokrotny pomiar rejestratora w takiej samej odległości od lampy rentgenowskiej ($x = 115$ mm) przy czterech mocach lampy: 4, 8, 16 i 39 W. Zgodnie ze zmieniającym się rozmiarem średnicy wiązki promieniowania w ognisku. Wykres ilustrujący zestawienie wyników pomiaru przedstawia rys. 6.

Analiza wykresu przy ustawieniu mocy lampy rentgenowskiej dla mocy 4 i 8 W wykazała osiągnięcie przez rejestrator identycznej temperatury maksymalnej. Widoczny jest stopniowy wzrost temperatury oraz jej stabilizacja w punkcie 22,5°C, następnie obserwowany jest spadek temperatury związany z wyłączeniem lampy rentgenowskiej i rozpoczęciem procesu rekonstrukcji danych. Na fragmencie wykresu dla pomiaru przy mocy 16 W widoczny jest wzrost temperatury maksymalnej rejestratora o 0,1°C. W momencie osiągnięcia temperatury maksymalnej obserwowany jest okres stabilizacji, okres ten jest krótszy od poprzednich pomiarów ze względu na dłuższy czas nagrzewania mierzonego elementu do wartości maksymalnej. Po zakończeniu pomiaru widoczny jest spadek temperatury związany z czasem potrzebnym

na rekonstrukcję danych. W przypadku użycia maksymalnej mocy wynoszącej 39 W temperatura maksymalna mierzonego elementu wzrosła o 0,3°C w porównaniu do mocy 4 i 8 W. Ponadto na wykresie nie zaobserwowano widocznego punktu stabilizacji temperatury maksymalnej. Aby zweryfikować czy osiągnięto temperaturę maksymalną należałoby wydłużyć czas pomiaru przy zachowaniu identycznych parametrów.



Rys. 6. Wykres zmienności temperatury od czasu w funkcji mocy lampy rentgenowskiej

Fig. 6. The temperature variability vs. time for different power of the X-ray tube

Uzyskane w badaniach wyniki wskazują iż zarówno odległość mierzonego elementu od lampy rentgenowskiej jak i ustawiona jej moc mają wpływ na stabilność temperatury podczas pomiarów tomograficznych. Podczas pomiarów stwierdzono maksymalny gradient temperatury mierzonego elementu w wysokości około 0,3°C (wartość ta jest równa wartości dokładności rejestratora w całym zakresie pomiarowym, jednakże zmiana wskazania w zakresie kilku stopni jest dokładniejsza). W przypadku tomografu METROTOM 800 wzrost temperatury o 0,3°C wpływa na zmianę wymiaru elementu wykonanego z aluminium i zajmującego całą przestrzeń pomiarową o $\sim 0,2$ μm (dokładność pomiarów geometrycznych tomografu wynosi $4,5 + L/100$ μm). Dla większych tomografów o mocach i zakresach pomiarowych o rząd wielkości większych różnica wymiarów może wpłynąć na dokładność pomiarów geometrycznych. Ze względu na szybki rozwój techniki tomograficznej jak i wzrost dokładności produkowanych tomografów w algorytmach rekonstrukcyjnych należy zastanowić się nad uwzględnieniem zmiany temperatury mierzonych elementów w czasie wykonywania pomiarów.

6. Literatura

- [1] Ratajczyk E.: Tomografia komputerowa w pomiarach geometrycznych 3D. *Pomiary Automatyka Kontrola PAK vol. 57, nr 2/2011*, s. 220-223.
- [2] 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*.
- [3] Kowaluk T., Woźniak A.: Study of porosity measurement using the computer tomograph. *Pomiary Automatyka Robotyka (PAR) nr 12/2012, s. 82-86*.
- [4] Kowaluk T, Woźniak A.: Study of computer tomography resolution using image quality indicators. *X-th International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biała, Poland, April 2012, Accuracy in coordinate metrology, eds. Wozniak A. et al, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej, Bielsko-Biała 2012, pp. 96-103*.
- [5] Lingard, P.S., Purss, M., Sona, C.M., Thwaite, E.G., Mariasson, G.H.: Temperature perturbation effects in a high precision CMM. *Precision Engineering, v 13, n 1, Jan 1991, pp. 41-51*.
- [6] <http://www.zeiss.pl>
- [7] Kruth J.P., Bartscher M., Carmignato S., Schmitt R., De Chiffre L., Weckenmann A.: *Computed tomography for dimensional metrology. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 60 (2011), pp. 821-842*.