

Wpływ elementu odniesienia na wynik pomiaru okręgu na CMM

Bartosz Gapiński*, Andrzej Kołodziej**, Mirosław Grzelka*

*Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych, Instytut Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska

**Wydział Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu

Streszczenie: Współrzędnościowa technika pomiarowa rozwija się dynamicznie od wielu lat. Dziś jest reprezentowana przez szereg urządzeń, takich jak współrzędnościowe maszyny pomiarowe czy skanery optyczne. Przy pomocy tych urządzeń dokonuje się pomiarów współrzędnych punktów reprezentujących mierzony obiekt. Następnie, stosując odpowiednie oprogramowanie komputerowe, wykonywane są obliczenia pozwalające na ocenę zmierzonych obiektów. Wśród najczęściej kontrolowanych elementów są otwory i wałki reprezentowane przez pojedynczy przekrój, czyli okrąg. W zależności od przyjętej strategii możliwy jest pomiar impulsowy lub ciągły (skaningowy). Następnym krokiem jest dobór elementu odniesienia, który pozwala na obliczenie parametrów elementu integralnego skojarzonego, jakim w rozpatrywanym przypadku jest okrąg zastępczy, oraz elementu pochodnego zastępczego, jakim w tym przypadku jest środek okręgu. Możliwe jest również wyznaczenie odchyłki kształtu na podstawie punktów pomiarowych oraz okręgu zastępczego. Zgodnie z normą ISO/TS 12181, do oceny parametrów okręgu możliwe jest stosowanie jednego z czterech elementów odniesienia. Możliwość zastosowania różnych elementów zastępczych oraz różnej liczby punktów pomiarowych wpływa na uzyskane wyniki pomiaru. W artykule przedstawiono wpływ strategii pomiarowej na uzyskiwane rezultaty, a także zalecenia wpływające na uzyskiwanie poprawnych metrologicznie rezultatów.

Słowa kluczowe: odchyłka kształtu, okrągłość, element odniesienia, CMM, strategia pomiaru

1. Wprowadzenie

Szeroko rozumiana współrzędnościowa technika pomiarowa jest obecna w świecie metrologii od wielu lat. Jej ciągły rozwój powoduje rozszerzenie obszarów zastosowania tych urządzeń. Obecnie bardzo silną pozycję na rynku zajmują współrzędnościowe maszyny pomiarowe oraz współrzędnościowe skanery pomiarowe 3D. Użytkowane są również ramiona pomiarowe, trackery laserowe, optyczne maszyny pomiarowe, czy rozwijające się od niedawna silnie pomiarowe tomografy komputerowe. Wybór odpowiedniego urządzenia pomiarowego powinien być uzależniony przede wszystkim od wymagań dokładnościowych stawianych kontrolowanym wymiarom [1, 2].

Szeroki wybór rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych CMM (ang. *Coordinate Measuring Machine*) pozwala na dobór urządzenia odpowiedniego zarówno pod kątem dokładności, przestrzeni pomiarowej, prędkości ruchu czy systemu próbkowania, a także w zakresie możliwości oprogramowania. Zastosowanie CMM o odpowiedniej dokładności pozwala na pomiar nie tylko geo-

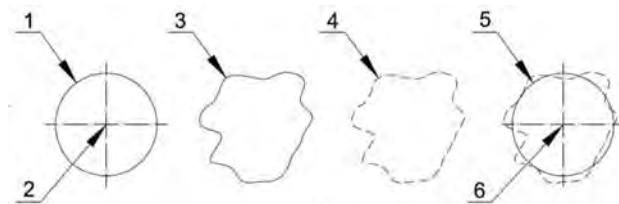
metrii mierzonej części, ale także na ocenę odchyłek kształtu i położenia [3–5].

Szeroki wybór możliwych do przyjęcia strategii pomiarowych powoduje, że niewiedza operatora CMM może prowadzić do uzyskania błędnych wyników pomiaru. Informacje płynące z przemysłu pokazują, iż wiedza na temat pomiaru i oceny geometrii elementu jest w większości przypadków wystarczająca. Jednak w obszarze oceny i interpretacji wyników odchyłek kształtu i położenia często spotykane są błędy wynikające z niezajomości materii.

2. Istota pomiaru współrzędnościowego oraz elementy odniesienia

Istotą pomiaru współrzędnościowego jest pomiar współrzędnych punktów opisujących mierzoną cechę kontrolowanego elementu. W przypadku stykowego pomiaru, z zastosowaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej, możliwy jest pomiar impulsowy oraz skaningowy. Skanining pozwala na szybkie rejestrowanie w krótkim czasie dużej liczby punktów opisujących mierzoną cechę. Jednak pomiar skaningowy jest mniej dokładny niż pomiar impulsowy, a koszt zakupu urządzenia z głowicą mierzącą jest wyższy. Dlatego w wielu aplikacjach pomiaru wykonywane są w trybie impulsowym.

W przypadku pomiaru okręgu metrologiczna minimalna liczba punktów pomiarowych wynosi cztery [1]. Jednak jest to wartość, która niedokładnie opisuje mierzony zarys, dlatego należy stosować większą liczbę punktów pomiarowych.



Rys. 1. Elementy geometryczne przyjęte do oceny zarysów okrągłości: 1) element integralny nominalny – okrąg nominalny, 2) element pochodny nominalny – środek okręgu nominalnego, 3) element rzeczywisty – okrąg rzeczywisty, 4) element integralny zaobserwowany – okrąg zaobserwowany (zmierzony), 5) element integralny skojarzony – okrąg zastępczy, 6) element pochodny skojarzony – środek okręgu zastępczego

Fig. 1. Geometrical elements applied to the evaluation of contour's roundness. 1) an integral nominal element – a nominal circle, 2) a derivative nominal element – a nominal center of the circle, 3) an actual element – an actual circle, 4) an indicated integral element – an indicated (measured) circle, 5) an integral associated element – a replacement circle, 6) a derivative associated element – a center of the replacement circle

Pomiar okręgu na CMM polega na zebraniu współrzędnych opisujących mierzony zarys.

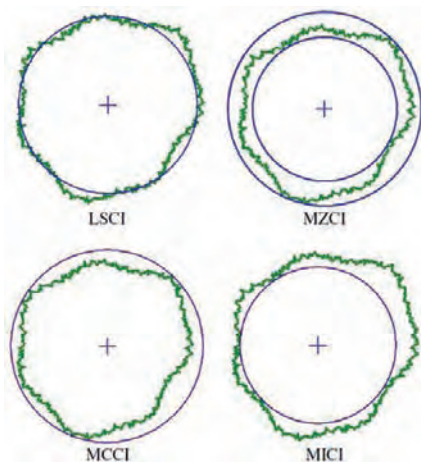
Program pomiarowy generowany jest w oparciu o elementy nominalne. W przypadku okręgu są to: element integralny nominalny – okrąg o wymiarach nominalnych oraz element pochodny nominalny, czyli położenie środka rozpatrywanego okręgu. Następnie dokonywany jest pomiar elementu (okręgu) rzeczywistego. Zostaje on opisany współrzędnymi punktów pomiarowych, co pozwala na uzyskanie elementu integralnego zaobserwowanego (okręgu zaobserwowanego). Z uzyskanych w ten sposób wartości obliczony zostaje element integralny skojarzony – okrąg zastępczy oraz element pochodny zastępczy – środek okręgu zastępczego (rys. 1) [6].

Element integralny skojarzony obliczany jest zgodnie z normą ISO/TS 12181-1:2003 w oparciu o jeden z czterech elementów odniesienia [7, 8]:

- LSCI – okrąg średni nazywany również okręgiem Gaussa,
- MZCI – okręgi najmniejsze nazywane również okręgami Czebyszewa,
- MCCI – najmniejszy okrąg opisany,
- MICI – największy okrąg wpisany.

3. Wpływ liczby punktów pomiarowych

Na rys. 2 przedstawiono możliwe do zastosowania okręgi odniesienia. Różne kryteria ich obliczania mają bezpośredni wpływ na uzyskiwane parametry okręgu, tj. współrzędne położenia środka, średnicę oraz odchyłkę okrągłości. Uzyskane rezultaty zależą również od liczby punktów pomiarowych [9–12]. Wraz z jej wzrostem następuje coraz pełniejsze odtworzenie integralnego elementu zaobserwowanego (rys. 1). W efekcie uzyskiwane rezultaty charakteryzują się również coraz mniejszymi rozstępami, gdyż – niezależnie od położenia elementu względem układu współrzędnych – możliwa jest detekcja ekstremów odchyłki kształtu elementu rzeczywistego. Po osiągnięciu pewnej liczby punktów pomiarowych na-



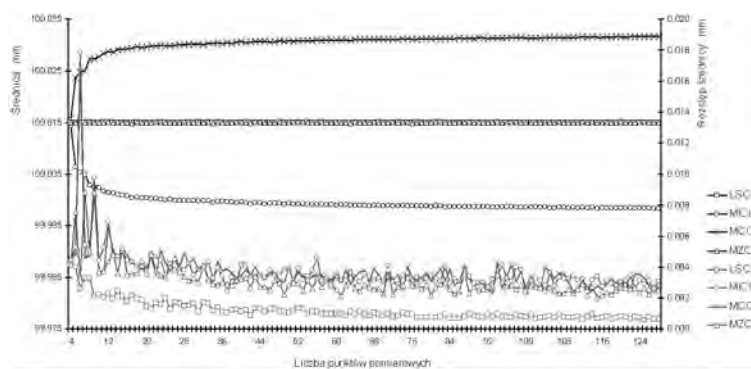
Rys. 2. Okręgi odniesienia wg ISO/TS 12181-1:2003 [7]

Fig. 2. Fitting elements according to ISO/TS 12181-1:2003 [7]

stępuje stabilizacja uzyskiwanych wyników, tak więc niecelowe jest nadmierne zwiększanie liczby punktów pomiarowych [13].

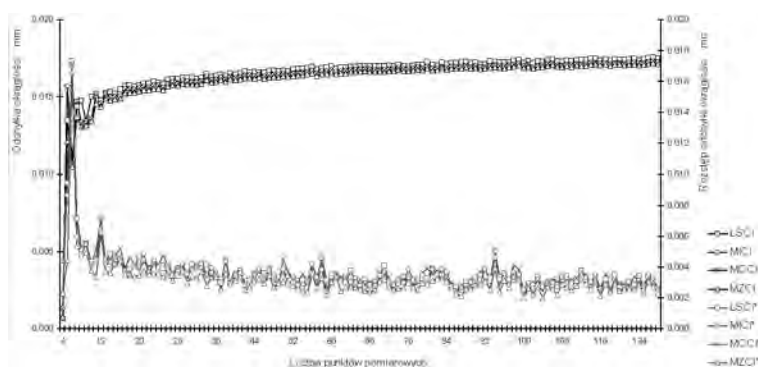
Na rys. 3–6 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji pomiaru okręgu dla różnej liczby punktów pomiarowych. Na rys. 3 oraz 4 zaprezentowano wyniki symulacji dla okręgu obciążonego często spotykaną odchyłką trójkątności. Natomiast na rys. 5 oraz 6 pokazano wyniki dla przykładowego okręgu obciążonego złożoną postacią odchyłki okrągłości – połączenie 2, 3, 7 oraz 48 harmonicznej.

Na rys. 3 oraz 5 przedstawiono wykresy obrazujące zmianę wartości średnicy w zależności od liczby punktów pomiarowych oraz elementu odniesienia. Analizując otrzymane rezultaty można zaobserwować, że trend zmian dla poszczególnych elementów odniesienia jest podobny. Uzyskiwane rezultaty ulegają stabilizacji niezależnie od położenia ekstremów okręgu względem osi układu współrzędnych. Można zaobserwować, że dla około 32 punktów pomiarowych następuje stabilizacja wartości średnicy oraz rozstępu. Niezależnie od postaci odchyłki okrągłości charakter zmian jest podobny.



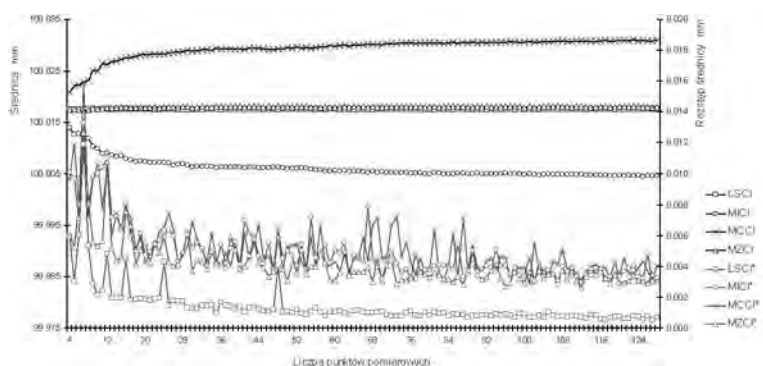
Rys. 3. Zmiana wartości średnicy okręgu w zależności od liczby punktów pomiarowych i elementu odniesienia. Gwiazdką „*” oznaczono zmianę wartości rozstępu dla średnicy w zależności od liczby punktów pomiarowych. Wartości symulowane dla okręgu obciążonego odchyłką trójkątności

Fig. 3. The change of the circle diameter in relation to number of measurement points and to the reference element. With the asterisk “*” it is marked the change of diameter range in relation to number of measurement points. Values are simulated for the circle with 3-lobbing deviation



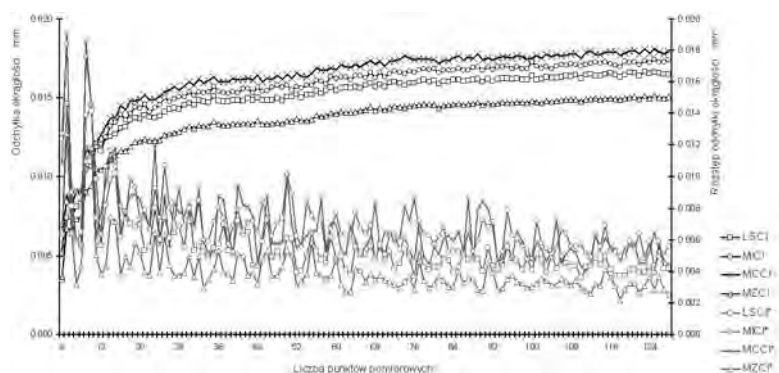
Rys. 4. Zmiana wartości odchyłki okrągłości okręgu w zależności od liczby punktów pomiarowych i elementu odniesienia. Gwiazdką „*” oznaczono zmianę wartości rozstępu dla odchyłki okrągłości w zależności od liczby punktów pomiarowych. Wartości symulowane dla okręgu obciążonego odchyłką trójkątności

Rys. 4. The change of the circle roundness deviation in relation to number of measurement points and to the reference element. With the asterisk “*” it is marked the change of roundness deviation range in relation to number of measurement points. Values are simulated for the circle with 3-lobbing deviation



Rys. 5. Zmiana wartości średnicy okręgu w zależności od liczby punktów pomiarowych i elementu odniesienia. Gwiazdką „*” oznaczono zmianę wartości rozstępu dla średnicy w zależności od liczby punktów pomiarowych. Wartości symulowane dla okręgu obciążonego złożoną postacią odchyłki okrągłości

Fig. 5. The change of the circle diameter in relation to number of measurement points and to the reference element. With the asterisk “*” it is marked the change of diameter range in relation to number of measurement points. Values are simulated for the circle with composite lobbing deviation



Rys. 6. Zmiana wartości odchyłki okrągłości okręgu w zależności od liczby punktów pomiarowych i elementu odniesienia. Gwiazdką „*” oznaczono zmianę wartości rozstępu dla odchyłki okrągłości w zależności od liczby punktów pomiarowych. Wartości symulowane dla okręgu obciążonego złożoną postacią odchyłki okrągłości

Fig. 6. The change of the circle roundness deviation in relation to number of measurement points and to the reference element. With the asterisk “*” it is marked the change of roundness deviation range in relation to number of measurement points. Values are simulated for the circle with composite lobbing deviation

Potwierdzają to badania przeprowadzone przez autorów dla różnych postaci odchyłki okrągłości, natomiast w artykule przedstawiono jedynie dwa wybrane przypadki. Można też zaobserwować zmianę wartości średnicy w zależności od zastosowanego elementu odniesienia. W przypadku elementów o silnie dominującej jednej harmonicznej (rys. 3) stabilizacja wyników następuje szybciej, dla złożonej postaci (rys. 5) wymagana jest większa liczba punktów pomiarowych do wykrycia wszystkich ekstremów mierzonego obiektu. Można jednak zaobserwować, że w każdym z przypadków po osiągnięciu około 32 punktów pomiarowych następuje stabilizacja wartości zarówno dla średnicy, jak i dla rozstępów.

Na rys. 4 oraz 6 przedstawiono wpływ liczby punktów pomiarowych oraz elementu odniesienia na wartość odchyłki okrągłości. Podobnie jak w przypadku średnicy, można zaobserwować znaczne rozstępy wartości dla małej liczby punktów – w wielu przypadkach nie są wykrywane ekstrema zarysu okrągłości, co powoduje uzyskanie nieprawidłowych warto-

ści odchyłki okrągłości. W przypadku elementu o dominującej jednej harmonicznej dla odchyłki okrągłości (rys. 4), detekcja ekstremów następuje przy mniejszej liczbie punktów. Dla elementu o złożonej postaci odchyłki okrągłości (rys. 6) niezbędne jest zebranie większej liczby punktów pomiarowych. W praktyce pomiarowej, umieszczając element w przestrzeni pomiarowej, nie możemy określić położenia ekstremów odchyłki kształtu względem kierunków osi układu współrzędnych. Ich położenie jest niejako losowe, co przekłada się na duże rozrzuty wartości odchyłki kształtu przy pomiarze z zastosowaniem niewielkiej liczby punktów pomiarowych. Jednak w każdym z przypadków dla około 32 punktów pomiarowych następuje stabilizacja uzyskiwanych rezultatów.

4. Wnioski

Pomiar elementów okrągłych (wałek/otwór) może być realizowany przy zastosowaniu różnych urządzeń. Wybór zależy od wymaganej niepewności i czasu pomiaru oraz rodzaju mierzonych parametrów. Znaczną rolę odgrywają również koszty całego systemu pomiarowego [2, 3]. Urządzeniami, które zapewniają relatywnie dużą dokładność, przy jednoczesnej szybkości i elastyczności realizowanych zadań pomiarowych, są współrzędnościowe maszyny pomiarowe. W przypadku pomiaru okręgu pozwalają na określenie zarówno położenia środka, wartości średnicy, jak i błędu okrągłości.

Możliwość użycia 4 elementów odniesienia pozwala na ocenę mierzonego okręgu w poprawny sposób. Zgodnie z zaleceniami przedstawionymi w pracy zespołu profesora Weckenmanna [14], do oceny odchyłki okrągłości wałka i otworu należy stosować elementy najmniejszej strefy MZCI. Natomiast pod kątem montażu i bazowania właściwe są elementy przylegające – MICI dla otworu oraz MCCI dla wałka. Dla oceny elementu pod kątem dalszej obróbki należy stosować okrąg MCCI dla otworu i MICI dla wałka. Nie zalecany jest natomiast okrąg średniokwadratowy LSCI. Powoduje on zbyt duże uśrednianie uzyskiwanych rezultatów.

Konieczna wydaje się zatem również analiza modelu odchyłki okrągłości, pozwalająca na opracowanie strategii pomiarowej, zapewniającej uzyskanie poprawnych metrologicznie wyników, a przy okazji na efektywne wykorzystanie CMM. Jest to szczególnie ważne w przypadku pomiarów części przeznaczonych do automatycznego montażu bądź przenoszących duże obciążenia.

Jednym z większych problemów w tym przypadku wydaje się być przekonanie operatorów CMM do zmiany przyzwyczajeń. Stosują oni najczęściej element LSCI i nie prowadzą analizy wpływu tego kryterium aproksymacyjnego na poprawność uzyskanych rezultatów. Jak przedstawiono w artykule, zastosowany element odniesienia wpływa na wynik pomiaru parametrów okręgu. Wpływ na uzyskane wyniki ma również liczba punktów pomiarowych oraz właściwe zdefiniowanie układu współrzędnych części.

Bibliografia

1. Ratajczyk E.: *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
2. Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. WNT 2009.
3. Adamczak S., Jarema M.: *Analiza pomiarów zarysów okrągłości i współśrodkowości za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej*. „Przegląd Mechaniczny” Nr 9/2007 Supplement, ISSN 0033-2259, Indeks 37108, 141–145.
4. Kowalski M.: *Analiza pomiarów wybranych zarysów z odchyłkami kształtu za pomocą przyrządów pomiarowych 3-kordynatowych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska 1993.
5. Adamczak S.: *Normalizacja pomiarów struktury geometrycznej powierzchni. Cz.1: Ocena zarysów okrągłości (ujęcie tradycyjne)*. „Mechanik” 7/2003, 411–415.
6. Humienny Z. (red.): *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS)* – podręcznik europejski, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2004.
7. ISO/TS 12181-1:2003: *Geometrical Product Specifications (GPS) – Roundness – Part 1: Vocabulary and parameters of roundness*. International Organization for Standardization 2003.
8. Adamczak S.: *Elementy geometryczne i strategie pomiarowe oceny zarysów kształtów*. „Przegląd Mechaniczny” Zeszyt 9S/2005, 87–91.
9. Gapiński B.: *Dokładność wyznaczania odchyłki okrągłości jako funkcja modelu błędu kształtu, elementu odniesienia i liczby punktów pomiarowych*. Rozprawa doktorska, Poznań 2008.
10. Chan F.M.M., King T.G., Stout K.J.: *The influence of sampling strategy on a circular feature in coordinate measurements*. „Measurement” Vol. 19, No. 2/1996, 73–81.
11. Huang J.: *An exact solution for the roundness evaluation problems*. „Precision Engineering” 23/1999, 2–8.
12. Jywe W.-Y., Liu C.-H., Chen C.-K.: *The min-max problem for evaluating the form error a circle*. „Measurement” 26/1999, 273–282.
13. Gapiński B.: *The Roundness Deviation Measurement with CMM*. Coordinate Measuring Technique. Problems and implementations. University of Bielsko-Biala 2008, ISBN 78-83-60714-40-9, 279–288.
14. Weckenmann A., Knauer M.: *Comparability of Coordinate Measurements*. Zeszyty Naukowe PŁ Filii w Bielsku-Białej. Budowa i Eksploatacja Maszyn, Nr 44/1998, 245–255. ■

Influence of Reference Element on the Result of Measurement a Circle on the CMM

Abstract: Coordinate measuring technique has been developed strongly for many years. Today this technique is represented by a number of devices, such as coordinate measuring machines and optical scanners. Using these devices coordinates of points that represent the object are measured. Then, in order to value geometry of the measured object, calculations with appropriate computer software are performed. Some of the most often controlled elements are holes and shafts, represented by a single section or a circle. Depending on the adopted strategy there are possible pulsing or continu-

ous (scanning) measurement. The next step is to select a reference element, which allows to calculate parameters of an integral associated element. In considered case, this is a circle component replacement. What is more, the derivative component replacement (in this case it is the centre of the circle) is determined. On the basis of both measurement points and the circle replacement, shape deviations might be evaluated.

In accordance with ISO/TS 12181 to estimate parameters of the circle it is recommended to use one of four reference elements. The opportunity of applying alternative reference elements and different number of points affect measurement results. The aim of this paper is to present the influence of measurement strategy on the obtained results, and recommendations about how to get metrologically correct measurement results.

Keywords: form deviation, roundness, fitting element, CMM, measurement strategy

dr inż. Bartosz Gapiński

Adiunkt w Instytucie Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się współrzędnościową techniką pomiarową oraz pomiarami odchyłek kształtu. Rozprawę doktorską obronił w 2009 r. pod kierunkiem prof. dr inż. Jana Chajdy. Jest wykonawcą w wielu projektach i grantach badawczych. Autor kilkunastu publikacji w kraju i za granicą. Pełni funkcję Prezesa Koła SIMP przy Politechnice Poznańskiej. bartosz.gapinski@put.poznan.pl



dr inż. Andrzej Kołodziej

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej. W latach 1981–1999 pracował w przemyśle maszynowym południowej Wielkopolski. Od 1999 r. pracownik Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego w Kaliszu, Wydziału Politechnicznego, Katedry Mechaniki i Budowy Maszyn. W 2006 r. uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w zakresie budowy i eksploatacji maszyn na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania naukowe to Metrologia Wielkości Geometrycznych ze szczególnym uwzględnieniem postaci geometrycznej elementów połączeń stosowanych w budowie maszyn.

a.kolodziej@jp.pwsz.kalisz.pl



dr inż. Mirosław Grzelka

Adiunkt w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej. Specjalista od współrzędnościowej techniki pomiarowej. Otrzymał nagrodę naukową IV Wydziału Polskiej Akademii Nauk za wyróżnioną rozprawę doktorską w 2004 r.

miroslaw.grzelka@put.poznan.pl

