

PODWYŻSZANIE DOKŁADNOŚCI SKANINGOWYCH POMIARÓW KÓŁ ZĘBATYCH WYKONANYCH METODĄ SLA

Adam MARCINIEC¹
Tomasz DZIUBEK²
Małgorzata ZABORNIAK³

STRESZCZENIE

Artykuł przedstawia metodykę podwyższania dokładności skaningowych pomiarów kół zębatach wykonywanych metodą SLA. Obejmuje analizę uwarunkowań związanych z pracami projektowymi i technikami pomiarowymi. Opisuje proces digitalizacji, dobór parametrów pomiaru i obróbkę danych w systemach CAD, przez co dokładność pomiarów skaningowych staje się wyższa, a sam proces sprawniejszy i szybszy.

1. WSTĘP

Specyfika i duża różnorodność technik wytwarzania kół zębatach powoduje, że ich produkcja w głównej mierze koncentruje się w wyspecjalizowanych przedsiębiorstwach. Producenci mają obligatoryjny obowiązek sprawdzania otrzymanych w procesie wytwórczym kół przekładni. Nowa generacja przyrządów do pomiarów uzębienia, a także znaczący rozwój współrzędnościowej techniki pomiarowej rozszerzają zakres tych możliwości. Niestety dokładne pomiary są często niedostępne dla mniejszych zakładów produkcyjnych. Szczególnego wymiaru nabiera to również w przypadku

¹ dr hab. inż. Adam Marciniak, prof. PRz – Politechnika Rzeszowska

² mgr inż. Tomasz Dziubek – Politechnika Rzeszowska

³ mgr inż. Małgorzata Zaborniak – Politechnika Rzeszowska

produkcji jednostkowej, wytwarzania elementów prototypowych oraz elementów, dla których nie jest możliwe zdobycie dokumentacji (np. zabytkowych). Artykuł będzie obejmował analizę uwarunkowań związanych z pracami projektowymi i technikami pomiarowymi, takimi jak proces przygotowania modelu, możliwości przetwarzania danych. Wynikiem pracy będzie przedstawiona metodyka podwyższania dokładności skaningowych pomiarów kół zębatych. Zastosowanie optymalizacji metod pomiarowych w powiązaniu z metodami CAD/CAM, RP w procesie wytwarzania kół zębatych pozwoli na skrócenie czasu wykonania prototypu funkcjonalnego. Zastosowanie stereolitografii (SLA) daje możliwość wytwarzania kół zębatych z wysoką powtarzalnością i precyzją, w krótkim czasie. Dokładność modeli SLA w zależności od urządzenia i skalibrowania maszyny może dochodzić do 0,01 mm. Jest to najdokładniejsza z metod Rapid Prototyping (RP). Modele kół o dowolnych zarysach można zbudować w systemie CAD, a następnie wykonać je w aparaturze stereolitograficznej bez konieczności stosowania pracochłonnej obróbki skrawaniem. Koła z żywicy mogą mieć zastosowanie np. do sprzętu AGD.

Do pomiarów kół zębatych stosuje się głowice pomiarowe poczynając od głowic pomiarowych impulsowych stykowych do skaningowych bezstykowych. Obecnie można zaobserwować bardzo intensywny rozwój głównie metod bezstykowych w postaci różnych konstrukcji przestrzennych skanerów optycznych. Najpowszechniejszymi urządzeniami pozostają nadal współrzędnościowe maszyny pomiarowe (WMP). Wynika to z coraz łatwiejszego dostępu do tego typu urządzeń. Inne fakty potwierdzające częstsze wykorzystywanie WMP to większa dokładność oraz możliwość zastosowania do dyskretyzacji zarówno metod stykowych (głowice impulsowe czy skaningowe), jak i metod bezstykowych (głowice laserowe). W przypadku wykorzystania metod stykowych na WMP wprowadzie zyskujemy na dokładności, to jednak zwłaszcza przy dużej liczbie punktów pomiarowych czas dyskretyzacji elementu znacznie się wydłuża. Natomiast wykorzystanie do dyskretyzacji WMP wyposażonej w głowicę laserową, choć znacznie skraca czas dyskretyzacji, to niestety dane pomiarowe zbierane są mniej dokładnie (prawie o rząd wielkości) w porównaniu z głowicami stykowymi [1].

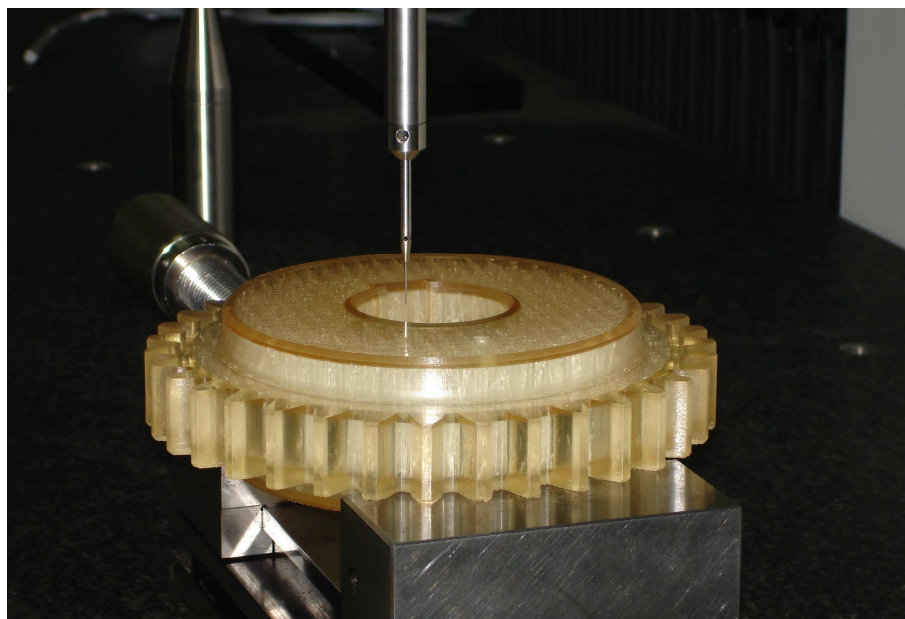
2. PRZEBIEG POMIARÓW KOŁA

Pomiarom skaningowym poddane zostało koło zębate wykonane w Laboratorium Szybkiego Prototypowania na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Do tego celu wykorzystano urządzenie stereolitograficzne SLA-250 produkcji firmy 3D Systems. Dokładność wykonania modelu dochodzi do 0,01 mm. Średnia moc lasera wynosiła 28 mW. Na dokładność koła wykonanego metodą SLA ma wpływ dokładność modelu

CAD. Szczególnie istotne są elementy związane z procesem polimeryzacji ciekłej żywicy fotoutwardzanej wiązką lasera, tj. grubość warstwy utwardzanej, rodzaj żywicy, średnica plamki lasera [2]. Na koło zębate została zastosowana żywica SL5170.

W zależności od tego, jakie pomiary zamierza się przeprowadzić i jakie posiada się oprzyrządowanie maszyny, tak należy zaplanować cały przebieg procesu pomiarowego.

Pierwszym etapem pomiaru jest orientacja mierzonego koła w przestrzeni pomiarowej WMP (rys.1.). Niezbędną czynnością do wykonania pomiarów jest ustalenie układu współrzędnych koła. Do tej czynności należy podejść z wielką uwagą, ponieważ błędy popełniane przy ustalaniu układu współrzędnych są powielane i obarczają sobą wszystkie następne pomiary (podobnie rzecz ma się z procesem kalibracji). Istotną sprawą jest odpowiedni wybór elementów geometrycznych w mierzonym kole na podstawie, których ustalony zostanie układ współrzędnych. W tym celu wybierane są podstawowe elementy geometryczne (tj. okrąg, prosta, płaszczyzna) wykonane w jak najwyższej klasie dokładności.

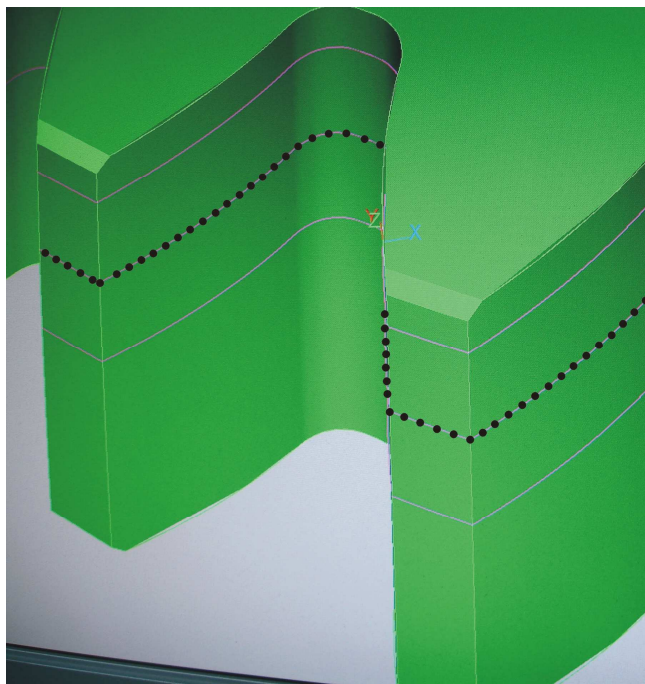


Rys. 1. Orientacja mierzonego koła w przestrzeni pomiarowej WMP

Kolejny etap to import modelu CAD i powiązanie go z mierzonym kołem. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż model CAD ma swój własny układ współrzędnych. Dlatego też konieczne jest jego przeniesienie do układu

współrzędnych przedmiotu mierzonego zdefiniowanego w przestrzeni pomiarowej.

Następnym etapem jest wybór strategii oraz parametrów pomiaru tj. kroku skanowania, prędkości, tolerancji. Skanowanie pozwala na szybką digitalizację obiektu rzeczywistego, umożliwiając pełniejszą analizę geometryczną i zmniejszenie niepewności otrzymanych wyników. Od jego jakości i dokładności zależy pracochłonność pozostałych etapów. Pomiary zostały przeprowadzone w płaszczyźnie czołowej (rys. 2.). Zgodnie z przedstawioną procedurą przeprowadzony został pomiar z następującymi parametrami: krok skanowania 0,1 mm, prędkość skanowania 5mm/s, średnica kulki pomiarowej 0,7 mm, tolerancje 0,02 mm. Pomiar okazał się czynnością czasochłonną i kłopotliwą. Z tego względu przeprowadzono drugi pomiar ze zwiększonym krokiem skanowania 0,5 mm, przy niezmienionych pozostałych parametrach.

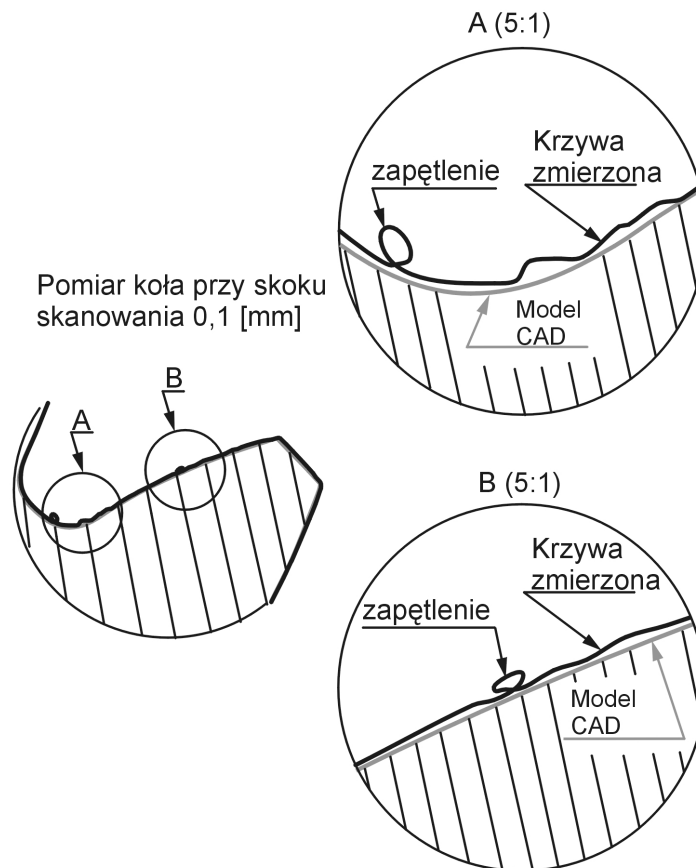


Rys. 2. Punkty pomiarowe koła zębatego w przekroju czołowym przy kroku skanowania 0,5 mm

3. SYSTEM OCENY ORAZ PODWYŻSZANIE DOKŁADNOŚCI POMIARÓW

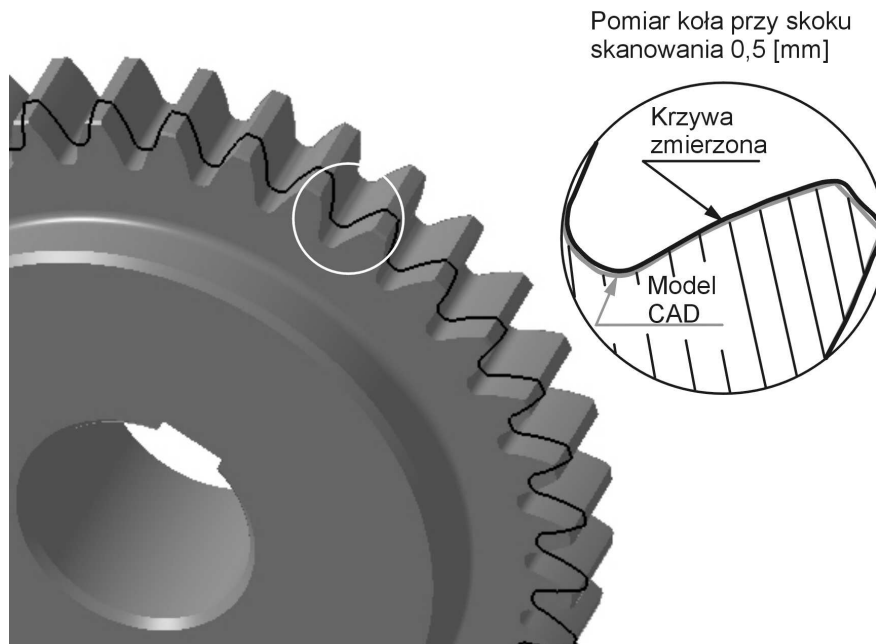
Skanowanie trójwymiarowe jest pomiarem obiektów rzeczywistych, każdy pomiar zaś nawet przeprowadzony wyjątkowo starannie i dokładnie obarczony jest pewnym błędem pomiarowym. Na wielkość tego błędu wpływa szereg czynników, począwszy od czynnika ludzkiego, poprzez proces przeprowadzania pomiaru, a kończąc na błędzie urządzenia wykonującego pomiar. Pomijając wpływ czynnika ludzkiego, jako wartość niewymiarową oraz zakładając, iż pomiar przeprowadzony został zgodnie z wszelkiego rodzaju wymogami, można określić błąd urządzenia wykonującego pomiar. Błąd ten określany jest również w odniesieniu do pewnego założonego wzorca wymiarowego przedmiotu rzeczywistego. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, iż na podstawie pojedynczego badania nie możemy oceniać technik w niej zastosowanych, daje nam to jedynie pewien obraz sytuacji w konkretnym przypadku. Aby wyciągać wnioski dotyczące całej techniki zastosowanej w badaniu, należałoby przeprowadzić serię podobnego typu badań na różnych obiektach.

Na przykładzie pomiaru koła zębatego, otrzymano w wyniku skanowania, model składający się z chmury punktów, których ilość uzależniona jest od kroku skanowania. Mając na uwadze uniwersalne cechy maszyny i wysoką dokładność systemów pomiarowych problemem są algorytmy obliczające punkty pomiarowe skorygowane. Punkty te uzyskiwane są na podstawie oszacowanego wektora normalnego do mierzonej powierzchni w punkcie styku z końcówką pomiarową. Wektor ten jest obliczany na podstawie wzajemnego położenia punktów pomiarowych zaobserwowanych. Obliczanie wektora jest poprawne dla powierzchni o dużym promieniu krzywizny, natomiast dla mierzonych ostrych krawędzi błędnie wyliczony wektor normalny fałszuje wyliczenia punktów pomiarowych. Rys. 3. przedstawia efekt zapętlenia krzywej zdefiniowanej na podstawie szeregu zmierzonych punktów przy skoku skanowania wynoszącym 0,1 mm. Na skutek złego wyliczania wektora normalnego do powierzchni następowała zmiana kolejności punktów pomiarowych. Co powodowało w konsekwencji zapętlenie krzywych opisanych na tych punktach. Przetworzenie danych uzyskanych na podstawie pomiarów, polegające na zmniejszeniu liczby uzyskanych punktów, możliwa jest to zarówno w środowisku programowym WMP, jak również w systemie CAD. Niestety możliwości tych systemów nie zawsze zapobiegają powstającym zapętleniom krzywych. Trzeba podkreślić, że niewystarczająca jest również zmiana kolejności punktów, która podobnie jak pozostałe zabiegi jest pracochłonna.



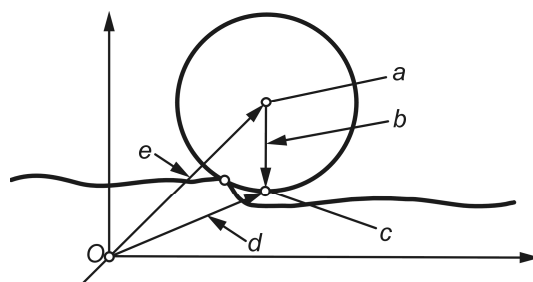
Rys. 3. Zapętlenia powstające podczas pomiaru przy skoku skanowania 0,1 mm

Zaproponowano kilka wstępnych rozwiązań przedstawionego problemu. Jednym ze sposobów eliminacji zapętleń krzywych, a tym samym podwyższaniem dokładności pomiarów skaningowych jest zwiększenie kroku skanowania, a co za tym idzie zmniejszenie liczby punktów pomiarowych. Efektem tej operacji jest eliminacja powstających zapętleń bez dodatkowej filtracji pomiarów (rys.4.), do której niezbędne jest wykorzystanie dodatkowego oprogramowania. Krok taki podjęto, z uwagi na to, że transfer danych pomiędzy różnego typu oprogramowaniem CAD wymaga częstej zmiany formatu plików, co skutkuje powstawaniem dodatkowych błędów. Zaletami proponowanego rozwiązania jest znaczne skrócenie samego pomiaru, a także czasu obróbki danych.



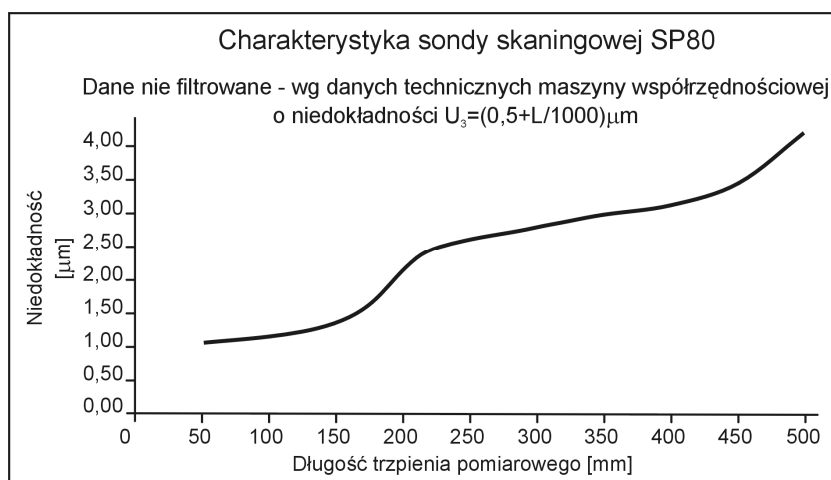
Rys. 4. Eliminacja zapętleń poprzez zwiększenie kroku skanowania

Aby zwiększyć dokładność pomiarów skaningowych, należy odpowiednio dobierać parametry skanowania w zależności od tego, z jakiego materiału jest mierzone koła zębatego. Należy tutaj zaznaczyć, że na dokładność pomiaru ma wpływ nie tylko krzywizna skanowanej powierzchni, ale również struktura i jakość powierzchni. Koła zębate SLA charakteryzują się „schodkową” budową powierzchni wynikającej z warstwowej budowy modelu. Warstwowa budowa modeli jest podstawowym źródłem odchyłek geometrycznych i chropowatości powierzchni. Zmniejszenie prędkości skanowania umożliwia bardziej precyzyjne przetwarzanie danych pozyskiwanych w procesie digitalizacji. Należy pamiętać, że przy doborze tego parametru, istotnym czynnikiem jest wspomniana już krzywizna powierzchni. Podczas pomiaru powierzchni o pewnej krzywiznie występują rozbieżności powodujące przesunięcie rzeczywistego punktu styku e od punktu nominalnego d , powodujące błąd pozycji. Do przekształcenia punktu pomiarowego zaobserwowanego w punkt pomiarowy skorygowany konieczne jest wprowadzenie wektora korekcji (rys. 5.). W związku z tym mając do pomiaru powierzchnię charakteryzującą się ostrymi krawędziami, nie możemy sobie pozwolić na duże prędkości skaningu.



Rys. 5. Wektor korekcji promienia końcówki trzpienia pomiarowego: a – punkt pomiarowy zaobserwowany; b – wektor korekcji promienia końcówki trzpienia pomiarowego; c – punkt pomiarowy skorygowany; d – wektor punktu pomiarowego skorygowanego; e – wektor punktu pomiarowego zaobserwowanego

Mając na uwadze wymienione powyżej propozycje podwyższania dokładności pomiarów skaningowych, nie można zapomnieć o odpowiednim doborze elementów składowych końcówki pomiarowej. Ma ona znaczny wpływ na dokładność pozyskiwanych wyników. Im więcej elementów pośrednich w układzie pomiarowym, tym większa jego bezwładność, a co za tym idzie zwiększenie błędnych punktów pomiarowych. W związku z tym, aby zmontować układ końcówki pomiarowej w taki sposób, by możliwe było połączenie go z głowicą pomiarową, musimy liczyć się z wydłużeniem przedłużaczy trzpieni pomiarowych. Rysunek 6 przedstawia zależność niedokładności skaningu głowicy pomiarowej SP80 w funkcji długości trzpieni pomiarowych [1].



Rys. 6. Wykres błędów głowicy SP80 w funkcji długości trzpienia pomiarowego

Poprzez skrócenie do minimum długości zestawu końcówki pomiarowej można wyeliminować w znacznym stopniu błędy wynikające z jego bezwładności. Wartości te mieszczą się w granicach od 1 do 4 μm przy długościach trzpieni od 50 do 500 mm. Niestety tego typu zabiegi nie zawsze są możliwe, co wynika ze specyfiki mierzonych powierzchni. W wyniku pomiaru krótkim trzpieniem pomiarowym pojawiają się ograniczenia dostępu do mierzonych powierzchni.

4. WNIOSKI

Podjmując decyzje na temat metody skanowania należy mieć na uwadze takie czynniki jak kształt mierzonego obiektu, dokładność procesu digitalizacji, szybkość skanowania i cenę usługi oraz format otrzymanych danych w aspekcie ich dalszego przetwarzania. Mając na uwadze te czynniki, po wykonaniu powyższych prac można sformułować następujące wnioski.

Mimo wysokiej dokładności maszyn pomiarowych informacje o krzywiznach mierzonych powierzchni mogą być zafałszowywane przez wbudowane w oprogramowanie algorytmy korekcji końcówki pomiarowej. Dzięki odpowiednio przeprowadzonemu procesowi digitalizacji dalsza obróbka danych w systemach CAD staje się sprawniejsza i szybsza. Poprzez odpowiedni dobór parametrów pomiarów tj. skoku skanowania, prędkości, zestawienie zespołu głowicy pomiarowej w odniesieniu do mierzonej powierzchni znacznie można podwyższać dokładność pomiarów skaningowych kół zębatych na WMP.

Szczegółowa wiedza na temat pomiarów kół wytwarzanych metodami RP pozwala na unikanie lub minimalizację błędów powstających podczas tworzenia modeli stereolitograficznych. Przez zastosowanie pętli sprzężenia zwrotnego, pomiędzy modelem CAD – urządzeniem RP – WMP, uzyskuje się znaczne skrócenie czasu, podwyższenie dokładności oraz zmniejszenie kosztów wytwarzania prototypu.

LITERATURA

- [1] *Budzik G.*: Synteza i analiza metod projektowania i wytwarzania prototypów elementów o skomplikowanych kształtach na przykładzie wirników turbosprężarek, Rzeszów 2007
- [2] PN-EN ISO 10360-1:2003 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 1: Terminologia
- [3] PN-EN ISO 10360-4:2002 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 4: CMM stosowane w trybie pomiaru skaningowego

- [4]Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
- [5]Swornowski P.: Bezstykowe pomiary na współrzędnościowej maszynie pomiarowej za pomocą głowic laserowych”, Mechanik 3/2006

INCREASING SCANNING ACCURACY OF GEARS MEASURED BY SLA METHOD

SUMMARY

The article presents the methodology of increasing the scanning accuracy of gears created by SLA method. The paper encompasses the analysis of the conditions connected with the design and measuring techniques. The digitalization process, measuring parameters selection and data processing by CAD systems, which increase the scanning measurements accuracy; rapidity and efficiency of process are also presented.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy rozwojowy (R03 021 02)