

Dariusz JANECKI, Jarosław ZWIERZCHOWSKI

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, WYDZIAŁ MECHATRONIKI I BUDOWY MASZYN,
Al. 1000lecia PP. 7, 25-314 Kielce

Metoda filtracji profilu walcowości zaobserwowanego metodą linii śrubowej

Dr hab. inż. Dariusz JANECKI

Mgr inż. elektronik – 1981 r. - Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki; doktor nauk technicznych – 1986 r. - automatyka i robotyka - Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki; doktor habilitowany – 1996 r. - automatyka i robotyka - Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa. Obecnie jest pracownikiem katedry Automatyki i Robotyki na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn. Zainteresowania: metrologia powierzchni, automatyka i robotyka, cyfrowe przetwarzanie sygnałów.

e-mail: djanecki@tu.kielce.pl



Dr inż. Jarosław ZWIERZCHOWSKI

Mgr inż. elektrotechnik – 2006 r. - Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki; doktor nauk technicznych - budowa i eksploatacja maszyn 2012 r., Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn. Obecnie jest pracownikiem katedry Automatyki i Robotyki na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn. Zainteresowania: metrologia powierzchni, automatyka i robotyka, cyfrowe przetwarzanie sygnałów, technika mikroprocesorowa.

e-mail: j.zwierzchowski@tu.kielce.pl



Streszczenie

W prezentowanej pracy opracowano sposób filtracji profilu walcowości w celu odseparowania kształtu badanego przedmiotu od pozostałych składowych geometrii powierzchni. Do oceny profilu walcowości zastosowano metodę linii śrubowej, dzięki której zaobserwowano powierzchnię walca. Metoda linii śrubowej, chociaż nie jest ujęta w normach to jest cytowana w literaturze. W rozważanej w pracy metodzie profil zaobserwowany składa się z trzech fragmentów: dwóch profili w przekrojach poprzecznych na obu brzegach analizowanej powierzchni i jednego profilu o kształcie linii śrubowej. W pracy zastosowano podejście funkcjonalowe, a dokładnie jego rozwinięcie i uogólnienie przedstawione w pracy [5]. Dodatkowo, aby uzyskać ciągłość profilu przefiltrowanego w punktach styku dwóch trajektorii w przekrojach poprzecznych i trajektorii linii śrubowej dołożono dodatkowe warunki równościowe. Profil przefiltrowany aproksymowany jest za pomocą sześciennych funkcji sklepanych. W pracy przedstawiono opis matematyczny zastosowanej metody filtracji oraz wyniki działania algorytmu filtracji dla rzeczywistych zaobserwowanych profilach walcowości zmierzonych metodą linii śrubowej.

Słowa kluczowe: walcowość, filtracja, linia śrubowa, funkcje sklepane.

Spline-functions used for filtering cylindricity profiles measured with the helical line method

Abstract

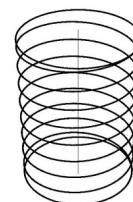
The aim of the work was to develop an algorithm for filtering a cylindricity profile measured by means of the helical line method. Although the helical line method is not included in the relevant standards, it is quoted in the literature on the subject. The method analyzed here assumes that a measured profile consists of three fragments: two cross-sectional profiles on both edges of the analyzed surface and one helical profile. A functional approach was applied to filtering the profile. To ensure continuity of the filtered profile at the point of contact of the two cross-sectional trajectories with the helical trajectory, additional equality conditions were used. The filtered profile was approximated by means of cubic spline functions. The work includes the mathematical description of the filtration method and the results of the filtration algorithm used for real cylindricity profiles measured with the helical line method. In the study there was also considered an important element affecting the filter properties. It is good selection of the distance between the nodes of approximating function.

Keywords: cylindricity, filtration, helical line method, spline.

1. Wprowadzenie

Do oceny profili walcowości stosowane są różne metody pomiarowe. W normie 12180 opisano cztery metody pomiarowe zalecane do pomiarów profili walcowości i należą do nich: metoda przekrojów poprzecznych, metoda przekrojów wzdłużnych, metoda "klatki" będąca kombinacją metody przekrojów poprzecznych i wzdłużnych oraz metoda punktowa [1]. Zaproponowane przez normę strategie pomiarowe dają pewne szczególne informacje

o mierzonym elemencie niż całościową ocenę jego walcowości. Związane jest to z faktem, że w praktyce jest trudno pokryć mierzony przedmiot teoretyczną minimalną liczbą punktów pomiarowych zapewniających odpowiednią gęstość ich rozłożenia. Obecnie najczęściej wykorzystywaną w przemyśle strategią metodą jest metoda przekrojów poprzecznych. W różnych pracach naukowych [2, 3], oprócz przedstawionych powyżej zalecanych metod można spotkać metodę pomiarową linii śrubowej przedstawioną schematycznie na rysunku 1. Zaletą linii śrubowej jest krótki czas pomiaru w porównaniu z metodami: przekrojów poprzecznych, przekrojów wzdłużnych, czy metody klatki.



Rys. 1. Walec zaobserwowany strategią linii śrubowej
Fig. 1. Cylindricity profiles measured with the helical line method

W procesie oceny poprawności wykonania elementu obrotowego ważne jest stwierdzenie na jakim etapie produkcji powstają ewentualne błędy powierzchni. Dlatego przyjmuje się, że chropowatość, falistość i kształt tworzą strukturę geometryczną powierzchni. W celu wyodrębnienia składowych kształtu o największych długościach fal stosuje się obecnie dolnoprzepustowe filtry cyfrowe. Jest oczywiste, że w celu oceny kształtu powierzchni walcowych zaobserwowany profil również wymaga filtracji w celu odrzucenia składowych falistości i chropowatości. Możliwe są dwa podejścia do zagadnienia filtracji profilu walcowości. W podejściu pierwszym stosuje się metody filtracji dwuwymiarowej (wzdłuż przekrojów poprzecznych i wzdłuż przekrojów wzdłużnych), których rezultatem jest trójwymiarowa aproksymacja powierzchni walca. Metoda ta ma jednak zastosowanie wtedy, gdy gęstość zebranych punktów pomiarowych jest duża. W praktyce jednak dokonuje się pomiarów szacunkowych, w których liczba przekrojów wzdłużnych i poprzecznych jest niewielka lub skok linii śrubowej jest duży. W takich przypadkach bardziej celowe jest dokonywanie filtracji jednowymiarowej wzdłuż trajektorii skanowania. W niniejszej pracy zastosowano to drugie podejście.

2. Opis metody pomiarowej i oznaczenia

Rozważmy układ współrzędnych kartezjańskich XYZ związany ze stołem pomiarowym w taki sposób, że oś Z pokrywa się z osią obrotu wrzeciona. Ze względu na sposób wykonywania pomiaru makrogeometrii powierzchni walcowych (skanowanie powierzch-

ni przedmiotu w wyniku obrotu wrzeczona i przesuwu pionowego czujnika) wygodnie jest również wykorzystywać układ współrzędnych cylindrycznych. Współrzędne punktu w układzie cylindrycznym związanym ze układem XYZ reprezentowane są przez trójkę liczb (φ, r, z) , gdzie φ jest współrzędną kątową punktu, r jest współrzędną promieniową (odległością punktu od osi Z) i z jest współrzędną wysokości. Dowolny profil walcowości można zapisać w sposób parametryczny za pomocą funkcji

$$r_{\text{cyl}}(\varphi, z), \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq z \leq H, \quad (1)$$

gdzie H jest wysokością walca.

Zastosowano następującą metodę pomiarową. Na początku wykonywany jest pomiar profilu poprzecznego na skraju mierzzonego profilu dla $z = 0$. Na przyrządzie pomiarowym z obrotowym stołem wykorzystującym metody bezodniesieniowe obserwacji tej dokonuje się przy włączonych obrotach silnika stołu pomiarowego i przy ustalonej wysokości czujnika pomiarowego. Następnie nie wyłączając obrotów wrzeczona, włączamy przesuw pionowy czujnika i rejestrujemy profile wzdłuż linii śrubowej. Po osiągnięciu żądanej wysokości końcowej wyłączmy przesuw pionowy i dokonujemy pomiaru w przekroju poprzecznym walca na wysokości $z = H$. Liczba zarejestrowanych zwojów linii śrubowej zależy od prędkości przesuwu pionowego i prędkości obrotowej stołu.

Założmy, że próbkowanie profilu zsynchronizowane jest z impulsami z enkodera napędu stołu (wrzeczona) pomiarowego, więc współrzędne kątowe kolejnych próbek profilu są równe

$$\varphi_i = \frac{2\pi i}{N}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad \text{gdzie } N \text{ jest liczbą próbek na jeden obrot stołu. W przybliżeniu możemy przyjąć, że współrzędne wysokości kolejnych punktów metody są równe, } z_i = 0 \text{ dla } i < N, \\ z_i = \frac{(k - N)dH}{N} \text{ dla } N \leq i \leq I - N \text{ i } z_i = H \text{ dla } I - N \leq i \leq I$$

gdzie I jest całkowitą liczbą próbek pomiaru, dH odstępem pomiędzy kolejnymi pętlami śruby.

3. Wygładzanie funkcji za pomocą sześciennych funkcji sklejanych

Na wstępie opiszemy algorytm filtracji dla profilu linii śrubowej, a więc dla profilu nieokresowego. Następnie podamy różnice, w podejściu do zagadnienia filtracji profili poprzecznych, będących profilami okresowymi. Położenie punktu linii śrubowej można uzależnić od wielu zmiennych, może to być kąt obrotu, przesunięcie wzdłuż osi Z lub np. odległość punktu od początku linii po rozwinięciu linii śrubowej. Dla większej czytelności stosowanych oznaczeń przyjmujemy, że jest to zmienna z .

Rozważmy funkcję dowolną $y(z)$, $z \in [0, H]$. Jednym ze sposobów wygładzania funkcji $y(z)$ jest jej aproksymacja za pomocą tzw. sześciennych funkcji sklejanych (ang. cubic splines). Założmy, że przedział $[0, H]$ podzielony jest na K jednakowych odcinków o długości T , tzn. $z_k = kT$, $H = KT$. Współrzędne końców odcinków z_k , $k = 0, 1, \dots, K$ nazywamy węzłami funkcji sklejaney. Sześcienna funkcja sklejana $y^f(z)$ klasy C^2 (podwójnie różniczkowalna) jest funkcją składającą się z kawałków funkcji będącymi wielomianami trzeciego stopnia określonymi na odcinkach $[z_k, z_{k+1}]$, $k = 0, \dots, K-1$. Matematyczną funkcję tę możemy zapisać w postaci

$$y^f(z) = y_k^f(z), \quad z \in [z_{k-1}, z_k], \quad (2)$$

$$y_k^f(z) = a_k + b_k(z - z_{k-1}) + c_k(z - z_{k-1})^2 + d_k(z - z_{k-1})^3. \quad (3)$$

Zdefiniujmy wektor parametrów krzywej sklejaney

$$\mathbf{\theta}^h = [\theta_1 \theta_2 \dots \theta_K], \quad \text{gdzie } \theta_k = [a_k \ b_k \ c_k \ d_k]. \quad (4)$$

Ponieważ $y^f(z)$ jest klasy C^2 , więc w węzłach funkcji z_k , $k = 1, \dots, K-1$ wartości, pochodne i drugie pochodne funkcji $y_k^f(z)$ i $y_{k-1}^f(z)$ są jednakowe, czyli

$$\frac{d^j y_k^f(z)}{dz^j} \Big|_{z=z_k} = \frac{d^j y_{k+1}^f(z)}{dz^j} \Big|_{z=z_k}, \quad k = 1, 2, \dots, K-1, \quad j = 0, 1, 2. \quad (5)$$

Zapiszmy równanie (5) w postaci macierzowej

$$\mathbf{B}_1 \mathbf{\theta}^h = \mathbf{0} \quad (6)$$

Zagadnienie wygładzania funkcji y za pomocą funkcji sklejaney y^f możemy zapisać w formie zadania minimalizacji funkcjonału

$$J^h = \int_0^H (y(z) - y^f(z))^2 dz \rightarrow \min_{y^f(z)}. \quad (7)$$

Łatwo zrozumieć, że im mniejszy jest odstęp pomiędzy węzłami T tym lepsza jest aproksymacja funkcji y przez y^f . Z kolei im większy jest odstęp T tym funkcja $y^f(z)$ jest bardziej gładka. Odpowiednią gładkość zapewnia z jednej strony odpowiednio niski rząd wielomianu aproksymującego oraz z drugiej spełnienie warunków gładkości w węzłach funkcji sklejaney. Przy ustalonym T odwzorowanie $y \rightarrow y^f$ można traktować jako liniowy filtr dolnoprzepustowy określony na przedziale $[0, H]$. W pracy [5] przedstawiono własności odwzorowania przy założeniu, że przedział $[0, H]$ zamienimy za całą oś rzeczywistą. Wyznaczając transformatę Fouriera odpowiedzi impulsowej filtru pokazano, że odwzorowanie to możemy traktować jako filtr dolnoprzepustowy o długości fali odcięcia $\lambda_c = \frac{T}{2}$.

Funkcjonał (7) możemy przedstawić jako formę kwadratową parametrów funkcji sklejaney, czyli

$$J^h = \frac{1}{2} \mathbf{\theta}^{hT} \mathbf{A}^h \mathbf{\theta}^h + \mathbf{b}^h \mathbf{\theta}^h + c, \quad (8)$$

gdzie \mathbf{A}^h jest macierzą symetryczną, dodatnią, blokowo-diagonalną o dość regularnej budowie. Wektor \mathbf{b}^h zależy od wartości y^f .

Złożoność zagadnienia możemy zmniejszyć wykorzystując warunki gładkości do redukcji odpowiedniej liczby zmiennych. Zaproponowana poniżej metoda gwarantuje dobre uwarunkowanie otrzymanych równań.

Zwróćmy uwagę, że mamy $3(K-1)$ warunków równościowych, a zatem w miejsce parametrów $\mathbf{\theta}^h$ możemy zdefiniować $K+3$ zmienne niezależne. Niech $y_0^f, y_1^f, \dots, y_K^f$ oznaczają wartości funkcji sklejaney w węzłach z_k . Dalej niech d_0 i d_K oznaczają wartości pierwszych pochodnych w punktach z_0 i z_K . Mamy

$$y_k^f = a_k, \quad y_k^f = a_k + b_k T + c_k T^2 + d_k T^3, \quad k = 0, 1, \dots, K-1, \quad (9a)$$

$$d_0 = b_k, \quad d_K = b_K + 2c_K T + 3d_K T^2 \quad (9b)$$

Oznaczmy

$$\tilde{\boldsymbol{\theta}}^h = [y_0^f \dots y_K^f d_0 d_K]^T \quad (10)$$

i zapiszmy równania (9) w postaci macierzowej

$$\mathbf{B}_2 \boldsymbol{\theta}^h = \tilde{\boldsymbol{\theta}}^h. \quad (11)$$

Równania (6) i (11) możemy zapisać w postaci

$$\mathbf{B}\boldsymbol{\theta}^h = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^h = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \tilde{\boldsymbol{\theta}}^h \end{bmatrix} \quad (12)$$

W rezultacie $\boldsymbol{\theta}^h = \mathbf{F}^h \tilde{\boldsymbol{\theta}}^h$, gdzie \mathbf{F}^h jest macierzą złożoną z $K+3$ pierwszych wierszy macierzy \mathbf{B}^{-1} . Ponadto macierz \mathbf{F}^h zależy od odstępów między węzłami funkcji sklejanej T . Wektor $\tilde{\boldsymbol{\theta}}^h$ nazwiemy wektorem zredukowanym.

Wykorzystując otrzymane zależności otrzymujemy

$$J^h = \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\theta}}^{hT} \mathbf{F}^{hT} \mathbf{A}^h \mathbf{F}^h \tilde{\boldsymbol{\theta}}^h + \mathbf{b}^h \mathbf{F}^h \tilde{\boldsymbol{\theta}}^h + c. \quad (13)$$

Ostatecznie parametry funkcji sklejanej wyznaczmy z

$$\tilde{\boldsymbol{\theta}} = -(\mathbf{F}^{hT} \mathbf{A}^h \mathbf{F}^h)^{-1} \mathbf{b}^h \mathbf{F}^h. \quad (14)$$

Zagadnienie filtracji nieco się upraszcza w przypadku, gdy funkcja aproksymująca $y^f(\varphi)$, $\varphi \in [0, 2\pi)$ jest funkcją okresową. W tym przypadku do warunków (5), w których zmieniamy z na φ dochodzi warunek

$$\left. \frac{d^j y_k^f(\varphi)}{d\varphi^j} \right|_{\varphi=\varphi_k} = \left. \frac{d^j y_{k+1}^f(\varphi)}{d\varphi^j} \right|_{\varphi=\varphi_0}. \quad (15)$$

Zatem obecnie mamy $3K$ warunków równościowych, a więc w miejsce wektora $\boldsymbol{\theta}^c$ możemy zdefiniować K zmiennych niezależnych. Przyjmijmy, że zmiennymi tymi będą wartości funkcji sklejanych w węzłach y_k^f , $k=0,1,\dots,K-1$, czyli $\tilde{\boldsymbol{\theta}}^c = [y_0^f \dots y_{K-1}^f]$. Mamy

$$y_n^f = a_n \quad k=0,1,\dots,K-1 \quad (16)$$

Zapisując powyższe równanie w postaci macierzowej otrzymujemy ostatecznie $\boldsymbol{\theta}^c = \mathbf{F}^c \tilde{\boldsymbol{\theta}}^c$. Pozostałe równania tzn. równanie (13), (14) mają postać analogiczną. Należy zwrócić uwagę, że macierz redukująca wymiar zagadnienia \mathbf{F}^c będzie miała nieco inną postać niż w przypadku filtracji profili nieokresowych.

4. Filtracja profilu walcowości zaobserwowanego metodą linii śrubowej

Poniżej zostanie przedstawiona metoda filtracji całego profilu walcowości zarejestrowanego za pomocą zaproponowanej metody pomiarowej. Metoda ta jest połączeniem opisanych powyżej metod filtracji profili okrągłości i linii śrubowej.

Niech teraz $\boldsymbol{\theta}_0^c$, $\boldsymbol{\theta}^h$, $\boldsymbol{\theta}_H^c$ będą parametrami funkcji aproksymującej profil walcowości w przekrojach poprzecznych i linii śrubowej, gdzie indeksy 0 i H oznaczają profile zmierzone na skrajach walca. Wprowadźmy oznaczenie

$$\boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{\theta}_0^c \boldsymbol{\theta}^h \boldsymbol{\theta}_H^c]^T. \quad (17)$$

Załóżmy, że parametry filtru powinny minimalizować funkcjonal

$$J = J_0^c + J^h + J_H^c = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{2} \boldsymbol{\theta}_i^{cT} \mathbf{A}^c \boldsymbol{\theta}_i^c + \mathbf{b}_i^{cT} \boldsymbol{\theta}_i^c \right) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\theta}^{hT} \mathbf{A}^h \boldsymbol{\theta}^h + \mathbf{b}^{hT} \boldsymbol{\theta}^h \stackrel{\text{df}}{=} \frac{1}{2} \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{A} \boldsymbol{\theta} + \mathbf{b}^T \boldsymbol{\theta} \quad (18)$$

Żądamy, by otrzymany profil był ciągły w tym sensie, że w punktach styku trajektorii skanowania wartości promienia przefiltrowanych profili okrągłości i linii środkowej były równe. Niech $y_0^c(\varphi)$, $y^h(z)$, $y_H^c(\varphi)$, będą funkcjami sklejającymi profile odpowiednio poprzeczny na dolnym skraju walca, linii śrubowej oraz poprzeczny na górnym skraju walca. Niech φ_0 , φ_H będą współrzędnymi kątowymi początku i końca linii śrubowej. Zatem muszą być spełnione ograniczenia równościowe

$$y_0^c(\varphi_0) = y^h(0), \quad y_H^c(\varphi_0^c) = y^h(H). \quad (19)$$

Warunki (19) można zapisać w zwartej postaci macierzowej

$$\mathbf{0} = \mathbf{G}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{G}\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \tilde{\mathbf{G}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}, \quad \mathbf{F} = \text{diag}[\mathbf{F}^c, \mathbf{F}^h, \mathbf{F}^c], \quad (20)$$

gdzie \mathbf{F}^c , \mathbf{F}^h są macierzami redukującymi wymiar zadania dla zagadnienia filtracji w przekroju poprzecznym i filtracji linii śrubowej.

Zdefiniujmy funkcję Lagrange'a

$$L = J + \boldsymbol{\lambda}^T \tilde{\mathbf{G}}\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \tilde{\mathbf{b}}^T \tilde{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{\lambda}^T \tilde{\mathbf{G}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}, \quad (21)$$

gdzie $\boldsymbol{\lambda} \in R^2$ jest wektorem mnożników Lagrange'a. Z warunków koniecznych optymalności otrzymujemy ostatecznie

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & \tilde{\mathbf{G}}^T \\ \tilde{\mathbf{G}} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\theta}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

czyli

$$\begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\theta}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & \tilde{\mathbf{G}}^T \\ \tilde{\mathbf{G}} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Ważnym elementem wpływającym na właściwości filtru jest odpowiedni dobór odstępów pomiędzy węzłami funkcji aproksymującej. Załóżmy, że powierzchnia walca jest izotropowa, tzn. ma te same właściwości we wszystkich kierunkach, to odstęp pomiędzy węzłami w przekrojach poprzecznych i wzdłużnych liczony wzdłuż trajektorii skanowania powierzchni powinien być obliczony następująco. Przyjmijmy, że żądany numer składowej odcięcia dla filtru w przekroju poprzecznym jest równy

$$n_c = \frac{2\pi R}{T_c}, \quad (24)$$

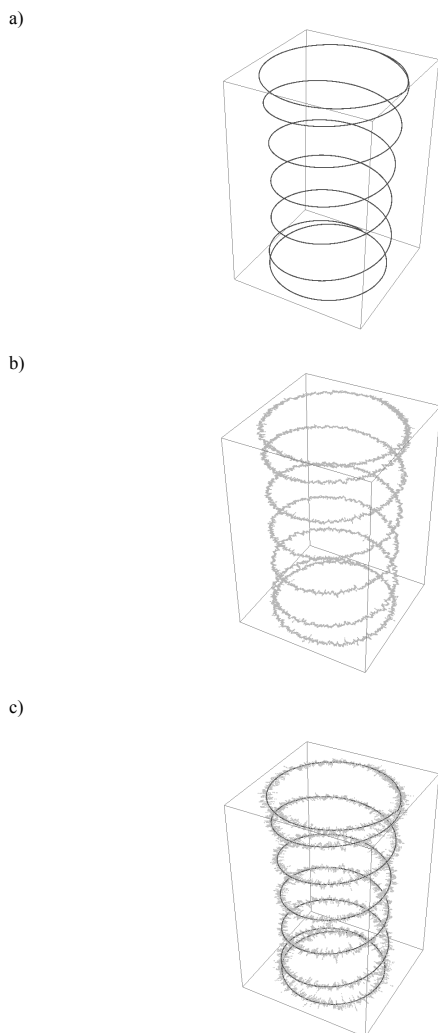
gdzie R jest promieniem mierzonego walca. W celu zapewnienia odpowiedniej gładkości profilu przefiltrowanego odstęp pomiędzy węzłami w przekroju poprzecznym powinien wynieść $T_c = 2n_c$.

Łatwo pokazać, że odstęp kolejnych węzłów w trajektorii linii śrubowej w przybliżeniu powinien wynieść

$$T_n = \frac{T_c dH}{2\pi R}. \quad (25)$$

5. Przykłady badań eksperymentalnych

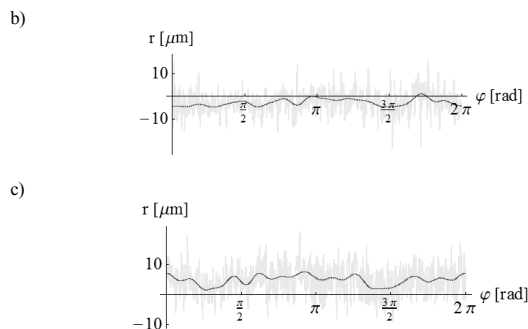
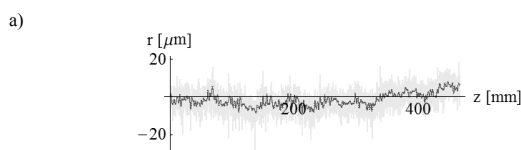
Badania eksperymentalne przeprowadzono na zmodernizowanym przyrządzie pomiarowym Talycenta firmy Taylor Hobson. Przedmiotem badanym był walec o wysokości 40. Zmierzony profil walcowości składa się z dwóch profili poprzecznych po 4096 próbek, linii śrubowej zawierającej po 4096 na jedną pełną pętlę śruby. Zmierzone 5 pełnych pętli śruby. Poniżej na rysunku 2 przedstawiono wyniki eksperymentu.



Rys. 2. Walec zaobserwowany strategią linii śrubowej: a) walec zmierzony, b) walec po filtracji, c) złożenie rysunków a i b

Fig. 2. Cylindricity profiles measured with the helical line method: a) measured cylindricity profile, b) cylindricity profiles after filtration, c) composition figures a and b

Na rysunku 2a przedstawiono profil zmierzony, na rysunku 2b profil przefiltrowany, a na rysunku 2c pokazano złożenie dwóch poprzednich części. Rysunek 3a przedstawia rozwinięcie trajektorii linii śrubowej. Kolorem jasnoszarym pokazano profil filtrowany zaś kolorem ciemnoszarym profil przefiltrowany. Rysunki 3b i 3c pokazują odpowiednio dolny i górny profil okrągłości. Podobnie jak w rysunku 3a kolorem jasnoszarym zaznaczono profil filtrowany zaś kolorem ciemnoszarym profil przefiltrowany.



Rys. 3. Profile zaobserwowane strategią linii śrubowej przedstawione w postaci rozwiniętej: a) trajektoria linii śrubowej, b) górny profil okrągłości, c) dolny profil okrągłości

Fig. 3. Profiles observed by the helical line strategy presented in the expanded form: a) trajectory of the helix, b) upper roundness profile, c) lower profile roundness

6. Wnioski

Do oceny profili walcowości stosowane mogą być różne metody pomiarowe. Najbardziej popularną metodą jest metoda przekrojów poprzecznych. Rzadziej stosowana jest metoda przekrojów wzdłużnych i metoda klatki. W pracy rozważono metodę linii śrubowej, która chociaż nie jest ujęta w normach jest cytowana w literaturze (Whitehouse, Żebrowska-Lucyk). W rozważanej w pracy metodzie profil zaobserwowany składa się z trzech fragmentów: dwóch profili w przekrojach poprzecznych na obu brzożach analizowanej powierzchni i jednego profilu o kształcie linii śrubowej. W celu wyodrębnienia składowych kształtu od składowych falistości i chropowatości mierzonego elementu stosuje się filtry cyfrowe. W przypadku powierzchni dwuwymiarowych powinny być to w zasadzie metody filtracji dwuwymiarowej. Jeśli jednak odstęp pomiędzy kolejnymi pętlami śruby nie jest znacznie mniejszy (przynajmniej dwa razy) od żądanej długości fali odcięcia filtra (cutoff length) dla zmiennej wysokości wystarczy zastosować filtrację jednowymiarową wzdłuż trajektorii skanowania analizowanej powierzchni. Dodatkowo, aby uzyskać ciągłość profilu przefiltrowanego w punktach styku dwóch trajektorii w przekrojach poprzecznych i trajektorii linii śrubowej dołożono dodatkowe warunki równościowe. Profil przefiltrowany aproksymowany jest za pomocą sześciennych funkcji sklepanych. W pracy przedstawiono opis matematyczny zastosowanej metody filtracji oraz wyniki działania algorytmu filtracji dla rzeczywistych zaobserwowanych profilach walcowości zmierzonych metodą linii śrubowej.

7. Literatura

- [1] ISO/TS 12180-1:2003, Geometrical product specifications (GPS) – Cylindricity – Part 1: Vocabulary and parameters of cylindrical form.
- [2] Whitehouse David.: Surfaces and Measurement. „Hermes Penton Science”, London 2002.
- [3] Czapski M., Żebrowska-Lucyk S.: Badania symulacyjne nad dokładnością wyznaczania helikoidalnej linii odniesienia w pomiarach odchyłek kształtu metodą bezodniesieniową. PAK nr 9bis, 2007, 503-506.
- [4] Krystek M.: Form filtering by splines. „Measurement” vol. 18, 1996, 9-15.
- [5] Janecki D.: A generalized L2 spline filter. „Measurement” vol. 42, 2009, 937-943.

otrzymano / received: 16.10.2012

przyjęto do druku / accepted: 03.12.2012

artykuł recenzowany / revised paper