

Krzysztof NOZDRZYKOWSKI¹, Łukasz NOZDRZYKOWSKI²

¹AKADEMIA MORSKA w SZCZECINIE, WYDZIAŁ MECHANICZNY, INSTYTUT PODSTAWOWYCH NAUK TECHNICZNYCH,
ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin, Polska

²AKADEMIA MORSKA w SZCZECINIE, WYDZIAŁ NAWIGACYJNY, INSTYTUT TECHNOLOGII MORSKICH,
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, Polska

Korygowanie zarysu okrągłości w oparciu o elementy analizy falkowej

Dr inż. Krzysztof NOZDRZYKOWSKI

Dr inż. Krzysztof Nozdrzykowski jest kierownikiem Zakładu Podstaw Budowy i Eksploatacji Maszyn Instytutu Podstawowych Nauk Technicznych Akademii Morskiej w Szczecinie. Jego działalnością naukową objęte są zagadnienia metrologii, makro- i mikrogeometrii powierzchni ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów błędów kształtu i położenia osi cylindrycznych dużych elementów maszyn.



e-mail: k.nozdrzykowski@am.szczecin.pl

Mgr inż. Łukasz NOZDRZYKOWSKI

Ukończył studia na Wydziale Informatyki Politechniki Szczecińskiej w 2006r. Obecnie jest asystentem w Instytucie Technologii Morskich Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Szczecinie. Jego zainteresowania naukowe obejmują systemy ochrony informacji, w szczególności kryptografię oraz steganografię.



e-mail: l.nozdrzykowski@am.szczecin.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono procedurę eliminacji z pomiarów zarysów okrągłości błędu systematycznego określanego mianem pełzania sygnału. Trój etapowa procedura korygowania błędu pełzania sygnału obejmuje filtrację górnoprzepustową zmierzzonego sygnału za pomocą transformaty falkowej, wyznaczenie wielomianu interpolacyjnego pomiędzy punktami końcowymi zarysu dla odsumowania przy wysokim poziomie dekompozycji oraz korekcję wykresu wyznaczonym wielomianem. Przeprowadzona ocena efektywności zaproponowanej procedury zrealizowana za pomocą rachunku korelacyjnego wykazała wysoki stopień korelacji pomiędzy skorygowanymi wykresami obciążonymi wcześniej błędem pełzania sygnału a wykresem, w którym ten efekt nie występował.

Słowa kluczowe: pomiary, analiza falkowa, korygowanie zarysu okrągłości.

Correcting the roundness profile basing on elements of the wavelets analysis

Abstract

The paper presents a procedure of elimination of the systematic error known as signal creeping from the roundness profiles. This error is revealed in the measurement of roundness by discontinuity of measurements, and in the graph by discontinuity of a profile. A three-step procedure for correcting the creep signal error includes: high-pass filtration of the measurement signal with use of the wavelet transform, calculation of polynomial interpolation between the terminal points of the profile to remove the noise at high levels of decomposition as well as correction of the graph with the specified polynomial. The evaluation of the effectiveness of the proposed procedure realized by the correlation demonstrated a high level of correlation between the corrected graphs loaded with the creep signal error and the graph without this error. The proposed procedure has good properties for correcting the error with maintaining the characteristics and features of the measured roundness profile.

Keywords: measurement, wavelet analysis, correction of the roundness profile.

1. Wprowadzenie

Pomiary parametrów elementów maszyn bazowanych w pryzmach należą do grupy tzw. odniesieniowych metod pomiarów. Odniesieniowe metody pomiarów zarysów kształtu charakteryzują się tym, że zmierzona odchyłka okrągłości ΔF różni się w mniejszym lub większym stopniu od jej wartości rzeczywistej ΔR . Wynika to z tego, że podczas pomiarów występuje chwilowy punktowy styk najczęściej nieregularnych zarysów okrągłości z tworzącymi pryzm ustalających. Prowadzi to do przemieszczania się środka mierzonego zarysu okrągłości, a w rezultacie do zafałszowania wyników pomiarów. Zastosowanie odpowiednio zdefiniowanych, przeliczeniowych współczynników, nazywanych współczynnikami wykrywalności pozwala przy znanej wartości

zmierzonej odchyłki okrągłości ΔF wyznaczyć jej wartość rzeczywistą ΔR .

Sprzęgnięcie pomiarów odniesieniowych z komputerową obróbką wyników pomiarów pozwoliło na opracowanie systemów pomiarowych przystosowanych do szybkich pomiarów realizowanych w warunkach przemysłowych lub aktywnej kontroli bezpośrednio na obrabiarce podczas realizacji procesu pomiarowego.

Przydatność metod odniesieniowych do pomiarów błędów geometrycznych walcowych elementów maszyn, w których to metodach wykorzystywane są pryzmy jako elementy ustalające, wykazana została zwłaszcza w przypadku pomiarów dużych i ciężkich elementów maszyn.

Komputerowa obróbka sygnału pomiarowego pozwala na korekcję określonych błędów systematycznych występujących w pomiarach odniesieniowych, do których należy zaliczyć między innymi tzw. błąd określany mianem pełzania sygnału. Błąd ten objawia się przy pomiarach okrągłości nieciągłością wyników pomiarów, a na wykresach niedomykaniem się zarysu okrągłości [1].

W przypadku pomiarów realizowanych metodami bezodniesieniowymi (maszyny pomiarowe, okrągłościomierze) błąd pełzania sygnału jest wynikiem przemieszczania się mierzonego detalu na stole pomiarowym a wynika najczęściej z niedoskonałości systemu mocowania mierzonych elementów.

W przypadku, gdy obiekt badany ustalony jest w pryzmach błąd ten może być wynikiem oddziaływania szeregu czynników takich, jak:

- błędy wykonania elementów ustalających (najczęściej pryzm rolkowych);
- błędy wykonania elementów mechanizmu realizującego ruch obrotowy obiektu mierzonego lub sposobem przekazywania napędu;
- oddziaływaniem czynników zewnętrznych (drzganiami);
- odkształceniami obiektu mierzonego podczas obrotów.

2. Kompensacja błędu pełzania sygnału

Najczęściej korekcja pełzania sygnału przeprowadzana jest przy założeniu, że ma on charakter liniowy a zmierzony zarys $F(x)$ wyraża się zależnością:

$$F_a(\varphi) = R(\varphi) + a\varphi, \quad (1)$$

gdzie: $R(\varphi)$ - jest zarysem rzeczywistym.

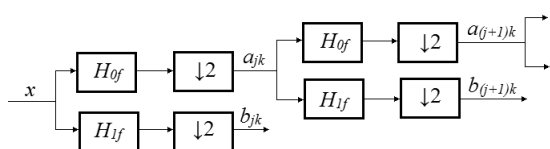
Metoda ta jest mało skuteczna, gdyż nie uwzględnia faktu, że sygnał mierzony zakłócany jest szumem wzmacniacza pomiarowego oraz mającymi charakter losowy drzganiami napędu wrzeciona.

Zastosowana metoda opisana w pracy [1] eliminuje wpływ tych czynników i w rezultacie parametr a w bardzo małym stopniu zależy od mierzonego zarysu.

Uwzględniając, że w przypadku pomiarów przedmiotu bazowego w pryzmach występować może szereg czynników, których efektem może być zjawisko określane mianem pełzania sygnału oraz koniecznością uniezależnienia zmiany mierzonego zarysu od wyników korekcji, zaproponowana została procedura kompensacji zarysu w oparciu o elementy analizy falkowej.

3. Analiza falkowa sygnału

Transformata falkowa jest podstawą analizy falkowej i może być (zgodnie z algorytmem Mallata [2]) realizowana jako iteracyjny proces dekompozycji sygnału przy pomocy zespołu filtrów dolno- i górnoprzepustowego na części dolnoprzepustowej iteracji poziomu wyższego. Wynikiem filtracji dolnoprzepustowej sygnału jest jego aproksymacja. W części górnoprzepustowej uzyskuje się informacje o detalach badanego sygnału. Proces rekurencyjnej dekompozycji sygnału przedstawia drzewo zespołów filtrów: górnoprzepustowego H_{if} dla detali oraz dolnoprzepustowego H_{of} dla wyznaczenia aproksymacji sygnału rys. 1.



Rys. 1. Drzewo zespołu filtrów dekompozycji. [2]
Fig. 1. A decomposition tree of the band filters

Na schemacie tym b_{jk} są współczynnikami detali poziomu j , zaś a_{jk} są współczynnikami aproksymacji dla poziomu j . Jednocześnie dochodzi do redukcji liczby współczynników o połowę, gdzie zachowywane są jedynie współczynniki aproksymacji i detali o numerach parzystych. Operacja redukcji współczynników o połowę przedstawiona została na prezentowanym schemacie w postaci oznaczenia $\downarrow 2$. W algorytmie Mallata, składowa wysokoczęstotliwościowa (detali) nie jest już dalej filtrowana. Jako proces iteracyjny, proces dekompozycji może być teoretycznie wykonywany nieskończenie długo. W rzeczywistych warunkach może on trwać do osiągnięcia pojedynczej próbki. W praktyce natomiast określa się liczbę poziomów dekompozycji uwzględniając naturę sygnału. Wybór funkcji falkowej determinuje rodzaj badanego sygnału i liczby punktów osobliwych, które powinny zostać wykryte. Im większa liczba punktów osobliwych tym odpowiednie w analizie są falki o krótkim nośniku [3].

4. Propozycja algorytmu korekcji efektu pełzania wykresu

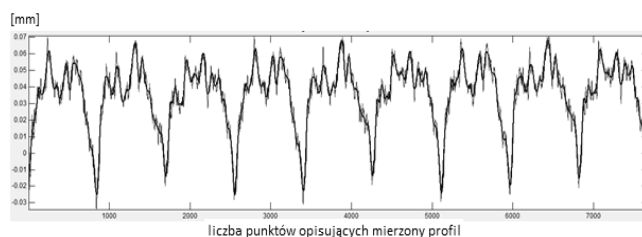
W pracy [1] zauważono, że problem niedomykania się wykresów okrągłości można rozwiązać w dwojaki sposób. Po pierwsze można iteracyjnie korygować pełzające odchyłki o wartości funkcji liniowej wyznaczającej charakter pełzania, po drugie zaś można użyć do niwelowania pełzania metod częstotliwościowych opartych na transformacie Fouriera. W pracy tej autor przedstawia propozycję obciążenia niskich częstotliwości z wykorzystaniem filtrów górnoprzepustowych.

Transformata Fouriera nie pozwala w swej klasycznej formie na wykrywanie osobliwości analizowanego sygnału, stąd też w niniejszym artykule zaproponowano wykorzystanie do tego celu transformaty falkowej.

Zaproponowany też został własny algorytm korekcji wykresu obejmujący:

- filtrację górnoprzepustową zmierzzonego zarysu z wykorzystaniem transformaty falkowej;
- wyznaczenie wielomianu interpolacyjnego pomiędzy punktami krańcowymi zarysu dla odszumiania przy wysokim poziomie dekompozycji;
- korekcję wykresu wyznaczonym wielomianem.

Mierzony zarys okrągłości może posiadać znaczną liczbę punktów osobliwych, stąd też do analizy proponuje się wykorzystanie funkcji falkowych wyższych rzędów.



Rys. 2. Przykładowy sygnał poddany analizie
Fig. 2. Example of the analyzed signal

Na rys.2 (linia czerwona) przedstawiony jest wykres dziewięciu cykli pomiarowych tego samego zarysu okrągłości na którym obserwuje się efekt pełzania sygnału. Wykres oznaczony linią czarną przedstawia zmierzone zarysy okrągłości, natomiast wykres oznaczony linią czarną zarys odszumiony przy pomocy czterostopniowej dekompozycji falkowej. Oznacza to iż zostały usunięte składowe niskoczęstotliwościowe. Do analizy została wykorzystana funkcja db9. Odszumianie zostało przeprowadzone dla czteropoziomowej dekompozycji falkowej, która najlepiej przybliża oryginalny zarys okrągłości.

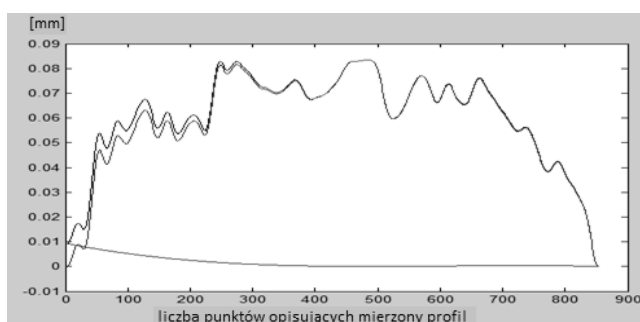
Dzięki usunięciu niskich częstotliwości wykres zostaje wygładzony, a różnice punktów niedomykania się poszczególnych pomiarów zostają zmniejszone. Nie usuwa to co prawda całkowicie efektu pełzania sygnału jednakże tak otrzymany wykres posiada bardzo przydatną cechę w postaci usuniętych ostrych maksimów (pików), które wprowadzają błąd w wizualnej interpretacji badanego sygnału. Maksima te odpowiadają drganiom wprowadzanym przez niedoskonałości układu pomiarowego.

W celu ostatecznego usunięcia efektu pełzania wykresu wyznaczony zostaje wielomian interpolacyjny Lagrange'a w postaci:

$$L_f(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) \prod_{j=0 \wedge j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}, \quad (2)$$

gdzie stopień wielomianu wynosi n dla $n+1$ punktów $x_0, x_1 \dots x_n$.

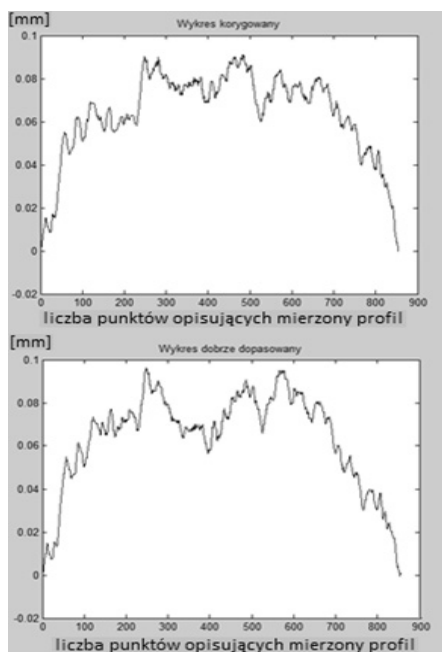
W metodzie korygowania zarysu okrągłości proponuje się wykorzystywać jako punkty interpolacji początek i koniec mierzonego zarysu przedstawionego na wykresie kartezjańskim oraz dodatkowy punkt charakterystyczny odpowiadający punktowi przegięcia dla interpolowanego wielomianu.



Rys. 3. Zarys okrągłości szóstego pomiaru
Fig. 3. Roundness profile of the sixth measurement

Problem budowania wielomianu Lagrange'a, który zostanie uwzględniony w procedurze korygowaniu mierzonego zarysu polega na wybraniu punktów pośrednich dla wyznaczenia tego wielomianu. Punkty te powinny zostać dobrane w zależności od charakteru zniekształceń zarysu. W przytoczonym przykładzie dla szóstego pomiaru przekroju mierzonego (rys. 3 linia niebieska

zarysu) zastosowano jeden punkt przyciągania wykresu ku wartości minimalnej, gdyż charakter zniekształcenia „pełzania” posiada okres większy od okresu powtarzalności mierzonego zarysu okrągłości. Wyznaczony w oparciu o tak wyliczony wielomian wykres interpolacyjny został następnie odjęty od wykresu zmierzonego (rys. 3 linia czerwona zarysu). Dla uproszczenia interpretacji wykres został przesunięty w górę powyżej osi OX.



Rys. 4. Skorygowany zarys okrągłości oraz zarys wzorcowy
Fig. 4. The corrected and standard roundness profile

Transformata falkowa pozwala na otrzymanie cech charakterystycznych profilu mierzonego i w dalszej kolejności wyznaczenie linii interpolującej umożliwiającej jego korekcję. W celu otrzymania skorygowanego zarysu mierzonego danego profilu, który cechuje się efektem pełzania, należy odjąć od wykresu zmierzonego bez filtracji uzyskany wykres interpolacji. Na rys. 4. przedstawiono wykres profilu skorygowanego z usuniętym efektem pełzania oraz wykres profilu zmierzonego w trakcie pomiarów którego nie wystąpił efekt pełzania sygnału. Dokonując oceny porównawczej zmierzonych zarysów z wykorzystaniem rachunku korelacyjnego można stwierdzić że poprzez zastosowanie zaproponowanej procedury korekcji udało się osiągnąć bardzo wysoki

stopień korelacji na poziomie 0.9429 z jednoczesnym usunięciem efektu niedomykania się wykresu. Pełne zestawienie wartości współczynników korelacji dla 9 przykładowych pomiarów z rys. 2 przedstawia tabela 1.

Tab. 1. Zestawienie współczynników korelacji pomiędzy zarysem nie obciążonym błędem pełzania sygnału a dziewięcioma kolejnymi pomiarami zarysów przekroju mierzonego w których ten efekt występuje
Tab. 1. Overview of the correlation coefficients between the no error profile and nine following measurements of the measured profiles with the creep effect

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.9856	0.9492	0.9260	0.9951	0.9446	0.9429	0.9985	0.9382	0.9553

Zgodnie z zaprezentowanymi wynikami średnia wartość współczynnika korelacji pomiędzy wykresem bez efektu pełzania i wykresami skorygowanymi zaproponowaną metodą w których ten efekt występował wynosi 0.9594.

5. Podsumowanie

Zaproponowana procedura eliminacji błędu pełzania sygnału charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami korekcji tego błędu z jednoczesnym utrzymaniem cech charakterystycznych i właściwości zmierzonego profilu. Potwierdzeniem tego wniosku są wysokie wartości współczynnika korelacji pomiędzy wykresem nie obciążonym błędem pełzania sygnału a skorygowanymi w oparciu o zaproponowaną procedurę korekcji wykresami, w których ten efekt występował.

Artykuł finansowany przez MNiSzW w ramach projektu badawczego nr N N503 070538.

6. Literatura

- [1] Adamczak S.: Odniesieniowe metody pomiaru zarysów okrągłości części maszyn. Monografie, Studia, Rozprawy. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1998.
- [2] Białasiewicz J.: Falki i Aproksymacje. WNT, Warszawa 2004.
- [3] Nozdrzykowski K., Nozdrzykowski L.: Zastosowanie analizy falkowej do oceny błędów kształtu XXIII Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, Rzeszów-Przemyśl 2007.

otrzymano / received: 15.08.2012

przyjęto do druku / accepted: 03.06.2013

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Bezpłatny dostęp do artykułów opublikowanych w PAK

Realizując idee Open Access przez miesięcznik PAK informujemy, że artykuły opublikowane w PAK są dostępne w wersji elektronicznej. Dostęp do artykułów opublikowanych jest bezpłatny, z zachowaniem 1 roku karencji. Artykuły w łatwy sposób można znaleźć korzystając z wyszukiwarki artykułów. Bazę artykułów można przeszukać po nazwisku autora, tytule artykułu lub po słowach kluczowych.

Tadeusz SKUBIS
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK