

# Pomiar falistości powierzchni w procesie szlifowania wgnębnego

## Measuring surface waviness during plunge-cut grinding

JAN BUREK  
PAWEŁ KUBIK  
ROBERT BABIARZ  
PAWEŁ SUŁKOWICZ\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.142>

Przedstawiono metodę pomiaru falistości powierzchni cylindrycznej podczas szlifowania w czasie rzeczywistym. W układzie pomiarowym zastosowano trzy czujniki indukcyjne. To umożliwia matematyczną analizę danych, eliminującą wpływ drgań przedmiotu obrabianego na wynik pomiaru.

**SŁOWA KLUCZOWE:** szlifowanie, falistość powierzchni, czujniki indukcyjne

*A method for measure a cylindrical surface waviness during grinding online has been presented. Three inductive sensors have been used in the measurement system. Thanks for that possible is mathematical data analyse which exclude a vibration influence on a measure waviness value.*

**KEYWORDS:** grinding, surface waviness, inductive sensors

Główną przyczyną powstawania falistości powierzchni walcowej przedmiotu w procesie szlifowania jest niewyównoważenie ściernicy, do którego dochodzi na skutek nierównomiernego zużycia jej powierzchni roboczej w czasie obróbki [1]. Z tego względu wprowadza się układy automatycznego wyważania ściernicy podczas szlifowania, montowane na jej wrzecionie [2, 3]. Z uwagi na stosunkowo wysoki koszt tych układów, a także niemożliwość bezbłędneho wyważenia ściernicy, zwłaszcza w przypadku ściernic o dużych średnicach, układy te nie znalazły szerszego zastosowania w praktyce przemysłowej.

Produkowane obecnie szlifierki ze sterowaniem CNC pozwalają na korekcję parametrów nastawczych w trakcie procesu szlifowania [4]. Są również wyposażane w układy kontroli czynnej średnicy przedmiotu, co umożliwia eliminację wpływu zużycia promieniowego ściernicy na dokładność wymiarową przedmiotu [5].

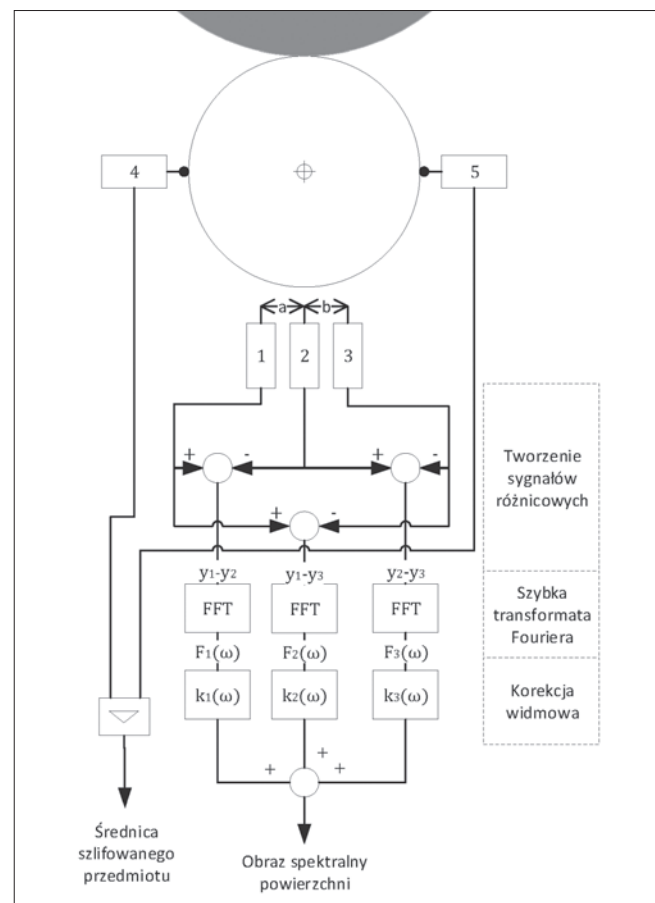
Zaproponowano, aby układ kontroli czynnej przedmiotu po doposażeniu w trzy czujniki indukcyjne zastosować do pomiaru falistości w czasie procesu szlifowania, co następnie można wykorzystać do sterowania stosunkiem prędkości obrotowej ściernicy do prędkości obrotowej przedmiotu. W ten sposób możliwa jest redukcja amplitudy falistości powierzchni w czasie rzeczywistym.

Celem badań było sprawdzenie możliwości wykorzystania czujników indukcyjnych do pomiaru falistości podczas szlifowania w czasie rzeczywistym.

### Metoda pomiaru falistości powierzchni

Badana metoda pomiaru falistości powierzchni podczas szlifowania opiera się na wykorzystaniu trzech czujników indukcyjnych 1, 2 i 3. Pozwala to na wyeliminowanie wpływu drgań na mierzony sygnał przez wykorzystanie metod matematycznych do obliczenia przesunięcia środka obrotu mierzonego przedmiotu. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 1.

Bazą układu nie jest przedmiot obrabiany, ale korpus układu kontroli czynnej. Stąd drgania przedmiotu obrabianego są wykrywane przez czujniki indukcyjne jako zmiana



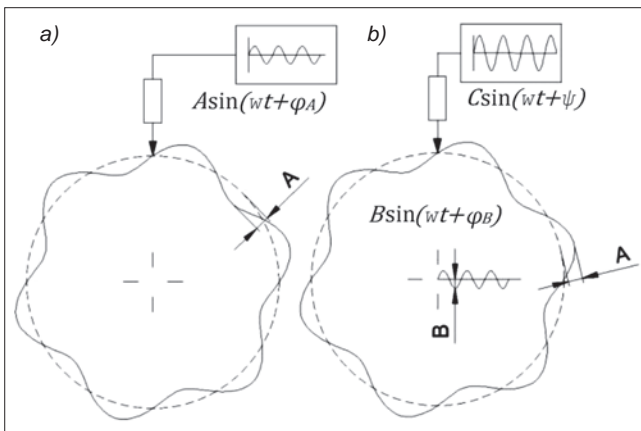
Rys. 1. Schemat układu pomiarowego falistości powierzchni podczas szlifowania: 1, 2, 3 – czujniki indukcyjne wykorzystywane do pomiaru falistości przedmiotu; 4, 5 – czujniki kontroli czynnej średnicy przedmiotu;  $y_1, y_2, y_3$  – sygnały pomiarowe z czujników 1, 2, 3; FFT – szybka transformata Fouriera;  $k_1, k_2, k_3$  – współczynniki korekcyjne

\* Dr hab. inż. Jan Burek prof. PRz (jburek@prz.edu.pl), mgr inż. Paweł Kubik (p.kubik@prz.edu.pl), dr inż. Robert Babiarz (robertb@prz.edu.pl), mgr. inż. Paweł Sułkowicz (sulkowicz@prz.edu.pl) – Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

odległości pomiędzy czujnikiem a przedmiotem obrabianym. Prowadzi to zmiany odległości pomiędzy czujnikiem i powierzchnią cylindryczną, co wywołuje błędy pomiaru profilu powierzchni. Dlatego konieczna jest eliminacja drgań na drodze matematycznej.

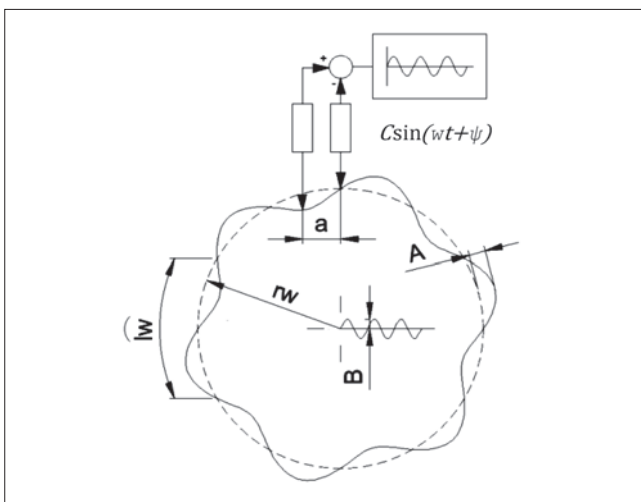
Jeżeli przebieg profilu powierzchni opisać się jako modulację sinusoidalną o równaniu:  $A \sin(\omega t + \varphi_A)$ , a przesunięcie środka przedmiotu obrabianego w kierunku równoległym do czujnika indukcyjnego równaniem:  $B \sin(\omega t + \varphi_B)$ , to mierzone wartości można opisać jako:  $C \sin(\omega t + \psi)$ .

Drgania przedmiotu pochodzą w głównej mierze od falistości powierzchni, stąd drgania ściernicy powodujące falistość mają tę samą częstotliwość, co drgania środka obrotu przedmiotu. Ze względu na nakładanie się fal o tej samej częstotliwości nie można usunąć składowych sygnału pochodzących od drgań bez dodatkowych informacji. Wpływ drgań na pomiar falistości przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Wpływ drgań przedmiotu na pomiar falistości: a) pomiar bez drgań, b) pomiar z uwzględnieniem drgań

W związku z tym stosuje się przynajmniej dwa czujniki pozwalające na eliminację składowych drgań przedmiotu z sygnału pomiarowego – jak na rys. 3.



Rys. 3. Pomiar falistości z wykorzystaniem dwóch czujników

Po zastosowaniu dwóch czujników sygnał wyjściowy oblicza się zgodnie z równaniem:

$$y_1(t) - y_2(t) = (A \sin(\omega t + \varphi_A) + B \sin(\omega t + \varphi_B)) + - ((A \sin(ax + \varphi_A + \varphi_T) + B \sin(\omega t + \varphi_B))) = C \sin(\omega t + \psi) \quad (1)$$

gdzie:

$$C = \sqrt{2A^2 + 2A^2 \cos((\varphi_A + \varphi_T) - \varphi_B)} \quad (2)$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{A \sin(\varphi_A + \varphi_T) + A \sin(\varphi_A + \varphi_T + 2\pi)}{A \cos(\varphi_A + \varphi_T) + A \cos(\varphi_A + \varphi_T + 2\pi)} \quad (3)$$

gdzie:

$A, B, C$  – amplituda falistości,

$$\varphi_T = \frac{aw}{2\pi r_w}$$

$a$  – odległość pomiędzy czujnikami,

$w$  – liczba fal,

$r_w$  – promień przedmiotu obrabianego,

$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$  – przesunięcie fazowe falistości.

Korzystając z równań (2) i (3), można obliczyć amplitudę falistości zgodnie z równaniem:

$$A = \frac{C}{\sqrt{2(1 - \cos \varphi_T)}} \quad (4)$$

Równanie (4) jest nieoznaczone, jeśli  $\varphi_T = 1$ . Jest to przypadek, gdy odległość  $a$  jest całkowitą wielokrotnością długości fali  $l_w$ . Sygnał różnicowy przyjmuje wtedy wartość 0 niezależnie od amplitudy falistości.

Aby wyeliminować nieoznaczoność, która występuje w przypadku pokrywania się odległości czujników z długością fali, trzy czujniki rozmieszcza się w różnych odległościach. Z czujników tych pochodzą sygnały pomiarowe:  $y_1, y_2, y_3$ , które po wzmocnieniu są przekazywane do bloku przetwarzania sygnałów.

W przypadku stosowania trzech czujników nieoznaczoność występuje, gdy suma trzech odległości pomiędzy czujnikami jest całkowitą wielokrotnością długości fali. Skoro odległość pomiędzy czujnikiem 1 i 3 jest sumą odległości pomiędzy czujnikami 1–2, 2–3, to sumę wszystkich odległości czujników można zapisać jako:  $2(a+b)$ . Z tego wynika, że w tej metodzie przez prawidłowy dobór odległości czujników można sprawić, żeby nieoznaczoność występowała dla długości fali, która jest poza zakresem częstotliwości falistości.

Aby wyznaczyć obraz spektralny falistości powierzchni, należy obliczyć różnice sygnałów:  $y_1 - y_2, y_1 - y_3, y_2 - y_3$ . Następnie wybiera się tę różnicę, dla której współczynnik korekcyjny  $k(\omega)$  jest najmniejszy. Otrzymany sygnał rozkłada się, korzystając z szeregu Fouriera:

$$u(t) = \frac{U_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin n\omega + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos n\omega \quad (5)$$

gdzie:

$$U_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega) \sin n\omega \, d\omega \quad (6)$$

$$V_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega) \cos n\omega \, d\omega \quad (7)$$

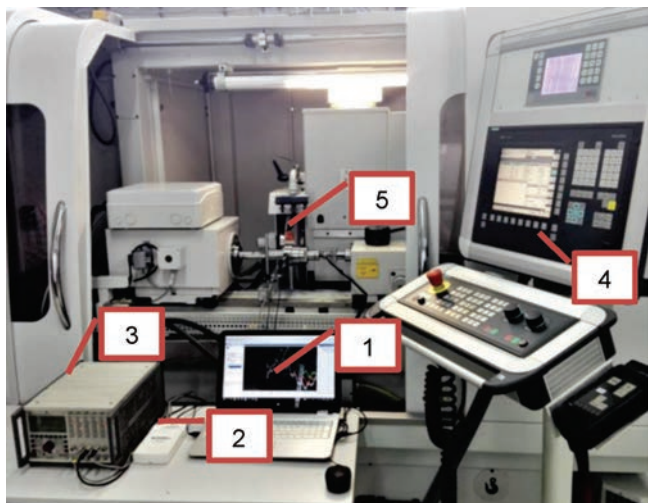
Pomija się stałą składową amplitudy  $U_0$  i wyznacza się amplitudy  $U_n$  i  $V_n$  składowych harmonicznymi dla sygnału różnicowego. Amplitudy harmonicznymi sygnału różnicowego oblicza się jako długości wektorów  $U_n$  i  $V_n$  według zależności:

$$C_n = \sqrt{U_n^2 + V_n^2} \quad (8)$$

Ostatnim etapem jest pomnożenie wartości  $c_n$  przez wartość współczynnika korekcyjnego  $k(\omega)$ . W ten sposób uzyskuje się widmo falistości powierzchni.

## Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zbudowano na bazie szlifierki do wałów Geibel & Hotz RS600C (rys. 4). W układzie kontroli czynnej średnicy przedmiotu zamontowano zestaw trzech czujników indukcyjnych firmy Tesa GT21, z których sygnały są przekazywane do wzmacniacza, karty pomiarowej i komputera.



Rys. 4. Stanowisko badawcze: 1 – komputer, 2 – karta pomiarowa, 3 – wzmacniacz, 4 – pulpit sterowania, 5 – czujniki indukcyjne

Wykorzystano czujniki charakteryzujące się zakresem pomiarowym  $\pm 2$  mm, maksymalnym błędem pomiaru  $0,2 + (3L3) \mu\text{m}$ , histerezą  $0,01 \mu\text{m}$  oraz maksymalną częstotliwością pomiaru 60 Hz [6].

## Wykonane pomiary

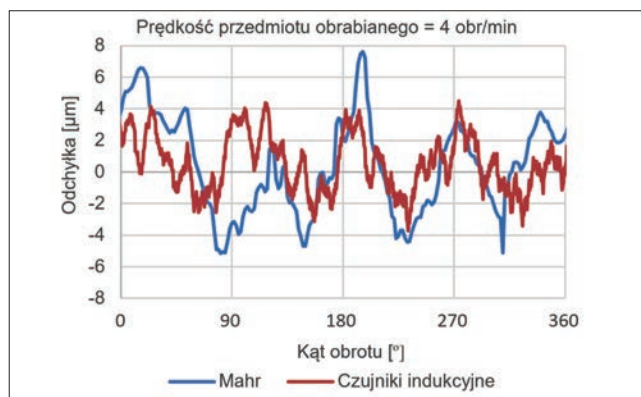
Mierzono falistość dla trzech prędkości obrotowych części obrabianych: 4, 8 i 16 obr/min. Zastosowane prędkości obrotowe przedmiotu w trakcie pomiaru wynikają z maksymalnej częstotliwości pomiaru czujników. W trakcie pomiaru wykorzystano próbkowanie o częstotliwości 100 Hz. Jednocześnie rejestrowano sygnały z trzech czujników indukcyjnych. Wyniki poddano cyfrowej obróbce w celu uzyskania rzeczywistego profilu powierzchni.

Jako dane referencyjne przyjęto pomiar wykonany na maszynie uniwersalnej do oceny przedmiotu obrabianego MarForm MMQ 400. Wyniki zarejestrowanych profili falistości przedstawiono na rys. 5–7. Kolorem niebieskim zaznaczono profil powierzchni zmierzony urządzeniem Mahr. Kolorem czerwonym – profil zmierzony czujnikami indukcyjnymi.

## Wnioski

Zastosowanie trzech czujników indukcyjnych pozwala na pomiar falistości powierzchni w czasie szlifowania. Ze względu na niską częstotliwość graniczną pomiaru czujników indukcyjnych powstają znaczne rozbieżności pomiędzy profilami z MarForm MMQ 400 i z czujników indukcyjnych w miejscach, gdzie występuje znaczna zmiana wysokości fali na krótkim odcinku pomiarowym.

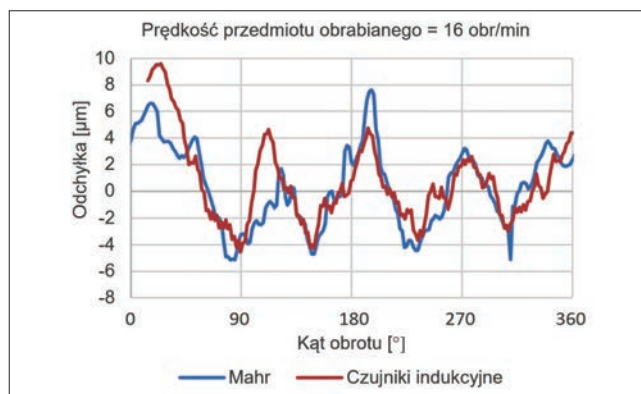
Można zaobserwować niewielkie rozbieżności w częstotliwości mierzonych fal. Mogą one wynikać z różnic pomiędzy rzeczywistą a przyjętą w obliczeniach prędkością obrotową przedmiotu obrabianego. Maksymalna różnica w wynikach pomiędzy urządzeniem MarForm a czujnikami indukcyjnymi nie przekracza  $8 \mu\text{m}$ .



Rys. 5. Zmierzony profil powierzchni przy prędkości obrotowej przedmiotu 4 obr/min



Rys. 6. Zmierzony profil powierzchni przy prędkości obrotowej przedmiotu 8 obr/min



Rys. 7. Zmierzony profil powierzchni przy prędkości obrotowej przedmiotu 16 obr/min

Należy zauważyć, że ze względu na przesunięcie fazowe powstałe przez położenie czujników w pewnej odległości od siebie, aby móc odwzorować powierzchnię w zakresie pełnego kąta, pomiar musi być wykonany dla obrotu większego niż  $360^\circ$ .

## LITERATURA

1. Fotch M. „Abbildung von Maschinenschwingungen auf die Werkstoffoberfläche beim Aussenrundscheifen”. *Industrie Anzeiger*. 73 (1987): s. 30–31.
2. Wójtowicz J. „Automatyczne wyważanie ściernic i diagnozowanie szlifierek”. *Mechanik*. 8–9 (1999): s. 579–581.
3. Liu C., Liu W., Mei C.L. „The design wheel balancing control system and control software”. *AER-Advances in Engineering Research*. 17 (2015): s. 1095–1098.
4. Burek J. „Pomiar parametrów procesu szlifowania dla realizacji sterowania adaptacyjnego (AC)”. *Pomiary Automatyka Kontrola*. 2 (1997): s. 36–38.
5. Marposs: Czujniki elektroniczne. Katalog główny.
6. Tesa: „Electronic Length Measuring Equipments”.