

Marek PISZCZEK, Henryk KRÓL

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, UL. KALISKIEGO 2, 00-908 WARSZAWA
WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH, UL. KALISKIEGO 2, 00-908 WARSZAWA

Diagnostyka obiektów mechanicznych metodami obrazowymi na przykładzie stanowiska do badania bicia pił tarczowych

Dr inż. Marek PISZCZEK

Jest absolwentem Wojskowej Akademii Technicznej (w 1995 ukończył studia na Wydziale Elektroniki) Od 2003 jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Instytutu Optoelektroniki WAT. Jego zainteresowania naukowe obejmują między innymi problemy z zakresu inżynierii informacji obrazowej. Do ważniejszych zagadnień, którymi się zajmuje należą opracowania dotyczące adaptacji techniki obrazowej do celów pomiarowych



e-mail: mpiszczek@wat.edu.pl

Dr inż. Henryk KRÓL

Henryk Król jest absolwentem Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej oraz Akademii Obrony Narodowej. Aktualnie jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Instytutu Systemów Elektronicznych WAT. Jego zainteresowania zawodowe koncentrują się wokół metod oceny systemów, a obecnie w szczególności systemów informacyjno-pomiarowych



e-mail: hkról@wel.wat.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące pomiaru bicia promieniowego i bocznego pił tarczowych z węglnikami spiekanymi. Proponowany układ pomiarowy oparty jest na wykorzystaniu technik wizyjnych. Wyznaczenie wartości bicia promieniowego i bocznego realizowane było w szeregu sesji pomiarowych oddzielnych dla każdego zęba i dla każdego rodzaju „bicia”. Szczególną uwagę zwrócono na procedurę kalibracyjną układu optycznego. Dokładność przeprowadzenia tej procedury ma bezpośredni wpływ na końcowe wyniki pomiarów. Wskazano również kierunek działań zmierzających do automatyzacji procedur kalibracyjnych i pomiarowych. Uzyskane wstępne wyniki wskazują na potrzebę prowadzenia dalszych badań nad tą metodą.

Słowa kluczowe: bicie promieniowe, bicie boczne, piła tarczowa, techniki wizyjne

Cutting saw run-out stand as an example of image processing for defective mechanical objects diagnostics

Abstract

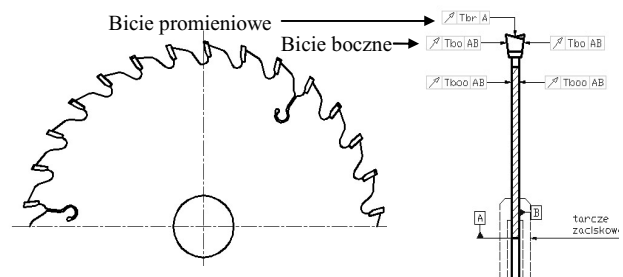
There are presented experimental results of radial run-out and axial run-out measurement of the timber cutting saw with cemented carbides. Measurement system based on visual inspection is proposed. Determination of value of the radial and axial run-out separately for each tooth and kind of run-out was provided in series of experiment sessions. Special attention was paid to optical arrangement calibration procedure. Accuracy of this procedure has direct influence on final measurement results. The need for automatization of such measurement and calibration procedures was pointed out. Preliminary results show us the need of following research this method.

Keywords: radial run-out, axial run-out, cutting saw, visual inspection

1. Wprowadzenie

Problem kontroli parametrów wytwarzanych produktów, ocena stopnia zużycia podzespołów w procesie eksploatacji to przykłady bardzo istotnych zagadnień technologicznych. Znajomość aktualnego stanu technicznego jakiegoś obiektu niejednokrotnie może zadecydować o jakości wytwarzanego produktu finalnego, efektywności całego procesu produkcyjnego a w efekcie również o sukcesie lub porażce rynkowej firmy. Rozwiązania z zakresu techniki obrazowej oferują istotne wsparcie dla ww. zagadnień dzięki możliwości tworzenia fotogrametrycznych systemów pomiarowych. Przedstawione opracowanie dotyczy idei

funkcjonowania takiego wizyjnego systemu pomiarowo-diagnostycznego na przykładzie stanowiska do badania bicia pił tarczowych. Przedmiotem badań są piły tarczowe z węglnikami spiekanymi. Są one najczęściej stosowanymi piłami do cięcia drewna, zarówno wzdłużnego, jak i poprzecznego. W trakcie badań poszczególnych parametrów pił szczególną uwagę poświęca się badaniom ich bicia promieniowego i bocznego.

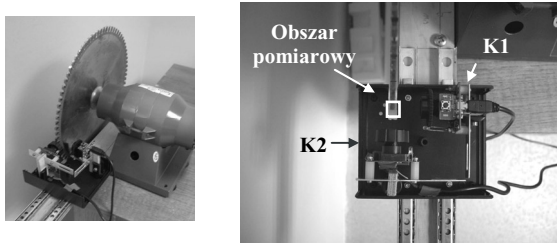


Rys. 1. Parametry bicia piły
Fig. 1. Cutting saw run-out parameters

Na podstawie przeprowadzonej analizy dostępnej literatury [2, 3, 4, 5] i zebranych uwag praktycznych w wyniku nawiązanej współpracy, z przedstawicielami Fabryki Pił i Narzędzi z Wapienicy, rozpoczęto prace nad projektem, którego celem było opracowanie nowej, bezstykowej (możliwie w dużym stopniu zautomatyzowanej) metody pomiarowej [1].

2. Charakterystyka metody i stanowiska

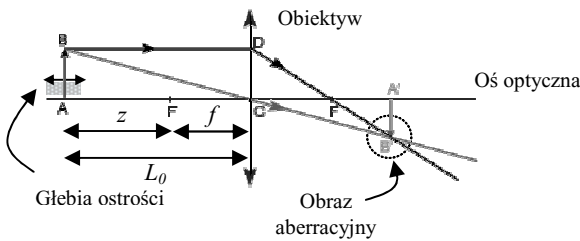
Stanowisko pomiarowe składa się z układu mocującego piłę tarczową i układu kamer przekazujących wyniki pomiarów do odpowiednio oprogramowanego komputera. Obsługa systemu (w trybie pomiarowym) polega na ustawieniu przez operatora piły w centralnej części obszaru pomiarowego i wyborze tzw. zęba odniesienia (pierwszy ząb pomiarowy) w stosunku do którego będą przeprowadzone pomiary. Idea metody badawczej oparta jest na fotogrametrycznej analizie obrazów pochodzących z dwóch wzajemnie ortogonalnych układów akwizycji K1 i K2 (rozdzielczość matrycy detekcyjnej VGA, ogniskowa $F=3,5\text{mm}$). Układy te, są układami optycznymi i każdy z nich realizuje metodę rzutu środkowego. Znajomość własności takiej metody rzutowania okazała się bardzo istotna przy opracowaniu procedury kalibracyjnej i pomiarowej.



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe z modułami akwizycji obrazów K1 i K2
Fig. 2. Test stand with image acquisition modules K1 and K2

2.1. Procedura kalibracyjna

Wykorzystanie w procesie pomiarowym metody fotogrametrycznej wiąże się z występowaniem szeregu zjawisk optycznych mających wpływ na uzyskiwane wyniki. Świadomość ich istnienia oraz możliwość korekcy decyduwać będzie o wyniku końcowym całego pomiaru. Wpływ wybranych własności optycznych układu przedstawiono na rys. 3.



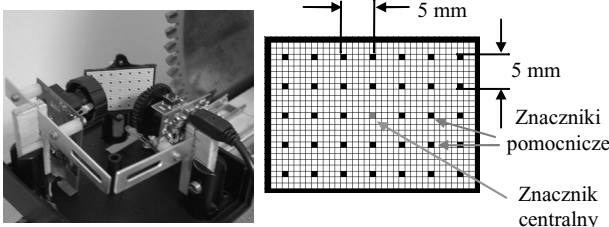
Rys. 3. Optyka układu pomiarowego
Fig. 3. Optics of measurement assembly

Obraz optyczny nigdy nie jest wiernym odwzorowaniem przedmiotu. Powodem tego jest:

- dyfrakcja światła na przysłonie aperturowej (ograniczająca rozdzielczość przyrządu),
- filtracja optyczna związana ze skończonymi rozmiarami układu optycznego,
- aberracje geometryczne wprowadzające zniekształcenia rzutu obserwowanego obiektu w płaszczyźnie obrazowej.

W przypadku występowania aberracji (aberracje geometryczne 3-go rzędu) w płaszczyźnie obrazowej obrazem np. punktu B nie jest punkt B' tylko zbiór punktów stanowiący obraz aberracyjny.

Korekcję w/w czynników oraz kalibrację układu pomiarowego przeprowadza się na stanowisku kalibracyjnym z wykorzystaniem odpowiednio zaprojektowanego obiektu testowego (rys. 4).



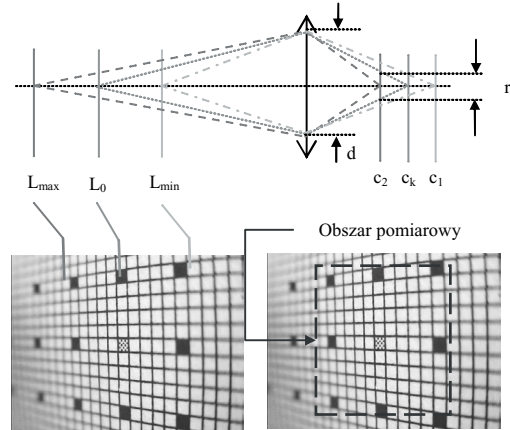
Rys. 4. Stanowisko kalibracyjne z obiektem testowym
Fig. 4. Calibration stand with test object

Całą procedurę kalibracyjną można podzielić na dwie części:
1. mechaniczną – część przygotowawcza dostarczająca odpowiednio przygotowany materiał obrazowy do analiz;
2. algorytmiczną – wyznaczająca parametry rzutowe układów K1 i K2 oraz sposób ich integracji umożliwiającą przeprowadzanie analiz 3D.

Kalibracja mechaniczna związana jest z justowaniem torów optycznych (uzyskanie odpowiedniej orientacji obiektu testowego w polach obrazowych kamer K1 i K2) celem ustalenia właściwej geometrii rzutowej – rzut pionowy znaczników A_T i B_T (rys. 6). Następnie ustawiana jest ostrość na centralnej części pola testowego i głębokość ostrości obejmująca cały obszar pomiarowy (rys. 5). Głębokość ostrości $\Delta L = L_{min} - L_{max}$ układu optycznego ogniskowanego na odległości L_0 (przy krążku rozmycia $r \sim 0,05mm$) opisują poniższe zależności.

$$L_{min} = \frac{c_1 f}{c_1 - f}; \quad c_1 = \frac{c_k d}{d - r} \quad (1)$$

$$L_{max} = \frac{c_2 f}{c_2 - f}; \quad c_2 = \frac{c_k d}{d + r} \quad (2)$$

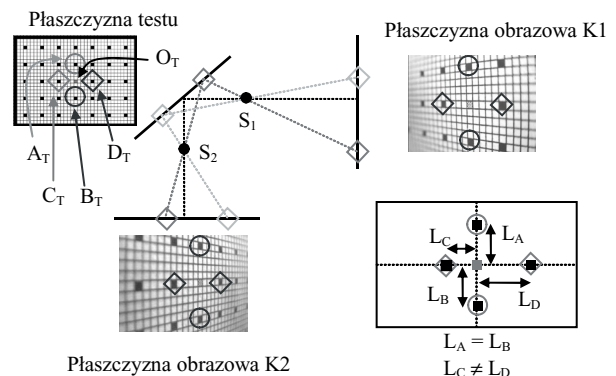


Rys. 5. Głębokość ostrości na obiekcie testowym z obszarem małych aberracji
Fig. 5. Test object depth of field with small aberration region

W przypadku rozpatrywanego stanowiska pomiarowego obrazy ogniskuje się na znaczniku centralnym O_T , dla którego przyjmujemy współrzędne przestrzenne $(0,0,0)$. Dla wykonanego układu pomiarowego głębokość ostrości $\Delta L \sim \pm 0,5mm$ (obejmuje cały obszar pomiarowy). Ograniczenie obszaru analitycznego obrazów pozyskiwanych z kamer K1 i K2 do obszaru pomiarowego w istotny sposób minimalizuje wpływ zniekształceń aberracyjnych (szczególnie dystorsji) na uzyskiwane wyniki pomiarowe.

Zadaniem kalibracji algorytmicznej jest wyznaczenie środków rzutów (S_1, S_2) dla układów K1 i K2. Dokonując przekształceń geometrycznych i algebraicznych na punktach obiektu testowego (o przyjętych umownie współrzędnych przestrzennych $P_T[x,y,z]$, np. A_T) i odpowiadających im rzutach w płaszczyznach obrazowych $P_{K1}[x,y,z]$ i $P_{K2}[x,y,z]$ wyznaczyć można środki rzutów, co przedstawia ogólna zależność funkcyjna (3) i rys.6.

$$S_{1(2)}[x,y,z] = f_{1(2)}(L_A, L_B, L_C, L_D) \Big|_{O_T, A_T, B_T, C_T, D_T} \quad (3)$$



Rys. 6. Kalibracja geometrii rzutowej
Fig. 6. Projective geometry calibration

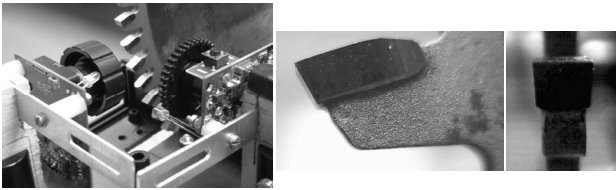
Kolejne zadanie kalibracji algorytmicznej wiąże się z określeniem przekształcenia rzutowego płaszczyzny testu w płaszczyzny obrazowe K1 i K2. Do tego celu została wykorzystana transformacja perspektywiczna 2D opisana zależnościami (4).

$$x_0 = \frac{Ax + By + C}{Dx + Ey + 1}; \quad y_0 = \frac{Gx + Hy + F}{Dx + Ey + 1} \quad (4)$$

Punkty x_0, y_0 oznaczają współrzędne w płaszczyźnie testu, natomiast x, y współrzędne w płaszczyznach K1 lub K2. Do określenia parametrów transformacji $\{A, B, C, D, E, F, G, H\}$ wykorzystywana jest znajomość współrzędnych 4 par punktów homologicznych (np. A_T i A_{K1}). W efekcie uzyskujemy dwa zestawy współczynników transformacyjnych $M_{K1}(A_1, \dots, H_1)$ oraz $M_{K2}(A_2, \dots, H_2)$ odpowiednio dla układów K1 i K2. Powyższy etap kończy całą procedurę kalibracyjną, której efektem są odpowiednio zorientowane w przestrzeni układy optyczne oraz parametry transformacji rzutowych umożliwiające wyznaczanie współrzędnych punktów charakterystycznych w przestrzeni 3D.

2.2. Procedura pomiarowa

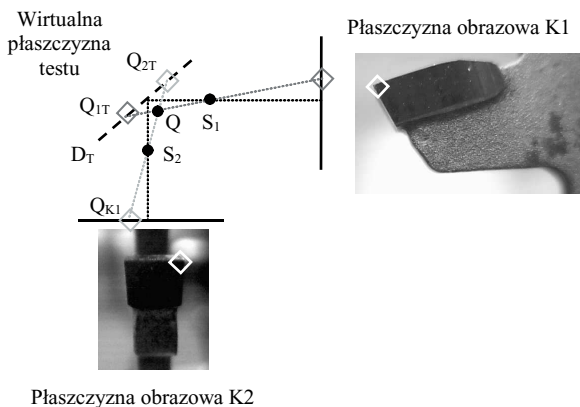
Po zakończeniu procesu kalibracyjnego z obszaru pomiarowego usuwana jest plansza testowa a w jej miejsce wprowadzana jest poddawana badaniom piła (rys. 7).



Rys. 7. Stanowisko pomiarowe z piłą w polu roboczym
Fig. 7. Test stand with the saw in the work field

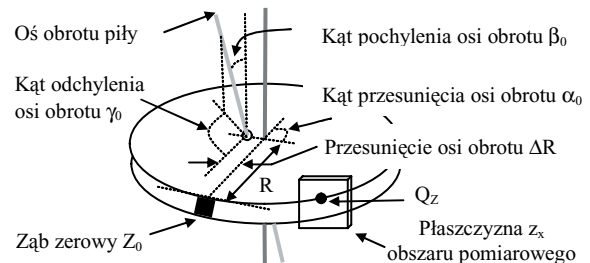
Kolejne kadry rejestrowane przez moduły wizyjne K1 i K2 dostarczają informacji o pozycjach zębów piły. Jako punkt wyjścia wprowadza się znacznik „zęba odniesienia” w stosunku do którego są przeprowadzane kolejne procedury analityczne. W pierwszym etapie pozycja n-tego zęba określana jest na wirtualnej płaszczyźnie testu (T) dzięki znajomości odpowiednich transformacji perspektywicznych 2D (M_{K1}, M_{K2}) uzyskanych w procesie kalibracyjnym. W następnej kolejności, wykorzystując informacje o położeniu punktów w płaszczyźnie T oraz środków rzutów (S_1, S_2) wyznaczana jest pozycja punktu Q w przestrzeni 3D (rys. 8), co opisano ogólną zależnością funkcyjną (5).

$$Q[x, y, z] = f(Q_{K1}, Q_{K2})_{S_1, S_2, M_{K1}, M_{K2}} \quad (5)$$



Rys. 8. Prezentacja graficzna wyznaczania punktu Q w przestrzeni
Fig. 8. Graph of the point Q 3-D spatial estimation

Rejestrując kolejne kadry (przemierzającego się zęba) możemy określić jego trajektorię w przestrzeni, jak również wyznaczyć miejsce jej przecięcia z płaszczyzną pomiarową z_x (rys. 9). Złożoność ruchu kolejnych zębów wynika nie tylko z faktu istnienia bicia promieniowego lub/i bocznego, ale także może się wiązać z innymi wadami piły (np. pozycja otworu mocującego piłę tarczową, płaskość piły), jak również sposobu jej montażu na wale pomiarowym (rys. 9).



Rys. 9. Dodatkowe czynniki wpływające na trajektorię zębów piły
Fig. 9. Additional factors, with have an effect on saw tooth trajectory

Istnienie ww. czynników objawia się w postaci mierzonych dodatkowych (okresowych) zmian położenia zębów. Chcąc zminimalizować wpływ (wymienionych powyżej) czynników towarzyszących pomiarom bicia piły, zaproponowany został algorytm, uwzględniający model okresowych zmian położenia zębów Q_z w płaszczyźnie pomiarowej z_x w funkcji kąta obrotu wału α .

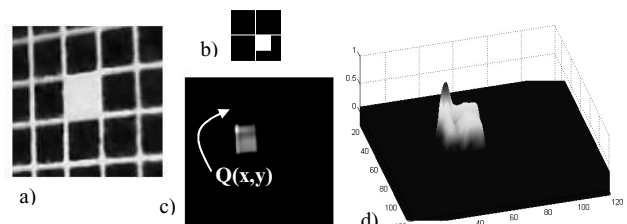
$$Q_z \begin{cases} x = \sqrt{R^2 + \Delta R^2 - 2R\Delta R \cos(\alpha_0 - \alpha)} \cdot \sin \beta_0 \cos(\gamma_0 - \alpha) \\ y = (R^2 + \Delta R^2 - 2R\Delta R \cos(\alpha_0 - \alpha)) \cdot (1 - \sin^2 \beta_0 \cos^2(\gamma_0 - \alpha)) \\ z = z_x \end{cases} \quad (6)$$

Aproksymując rozkłady punktów (Q_{z1}, \dots, Q_{z80} – dla kolejnych zębów piły) w płaszczyźnie z_x uzyskujemy krzywą „trendu” o współczynnikach ($\Delta R, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0$). Poziom bicia promieniowego i bocznego możemy oszacować na podstawie analizy różnicowej pomiarów z wyznaczoną krzywą, co przedstawiono na rys. 13.

2.3. Automatyzacja procedur

Pomiar obiektu (punktów charakterystycznych testu lub zęba) może być realizowany przez operatora systemu półautomatycznie (ręczne wskazywanie punktów) lub w sposób zautomatyzowany poprzez algorytmy analizujące obrazy.

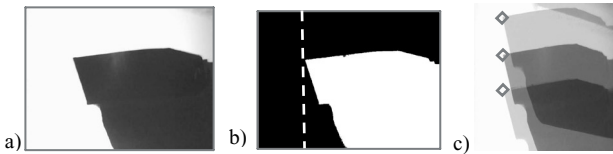
Automatyzacja w fazie kalibracyjnej polega na analizie korelacyjnej obrazów z płaszczyzn K1 i K2 ze wzorcem. Dzięki etapowi mechanicznej kalibracji znacznie zawężamy potencjalny obszar poszukiwań położenia punktów charakterystycznych (rys. 10-a). Zastosowanie odpowiedniej maski (rys. 10-b) umożliwia lokalizację punktu charakterystycznego (rys. 10-c,d), jako lokalne maksimum funkcji korelacyjnej.



Rys. 10. Poszukiwanie punktu charakterystycznego testu metodą korelacyjną
Fig. 10. Correlation method search for characteristic point of a test

Automatyzacja procedury pomiarowej możliwa jest dzięki obserwacji obiektu w „polu jasnym”. Zastosowanie takich warunków pomiarowych (gdzie ciemny obiekt przemieszcza się

na jasnym tle - rys. 11-a) umożliwiają (dzięki procesowi binaryzacji i analizie położenia konturów obiektu - rys. 11-b) śledzenie pozycji badanego zęba (rys. 11-c)




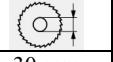
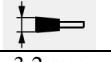
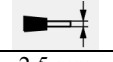
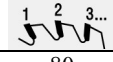
Rys. 11. Wyznaczanie punktu charakterystycznego zęba
Fig. 11. Estimation of saw-tooth characteristic point

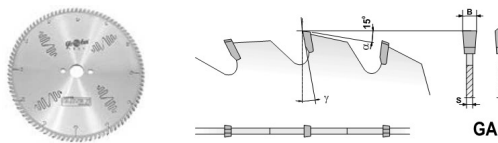
Pozostałe aspekty automatyzacji dotyczą możliwości automatycznego obrotu piły w trakcie sesji pomiarowej i korelacji tego obrotu z momentami rejestracji kolejnych kadrów przez układy akwizycji K1 i K2.

3. Wstępne wyniki

Testy przeprowadzono wg zaproponowanej metody wykorzystując opracowane (laboratoryjne) stanowisko pomiarowe dla piły typu GA-5 250x30x3,2/2,5; z = 80.

Tab. 1. Parametry piły
Tab. 1. Cutting saw parameters

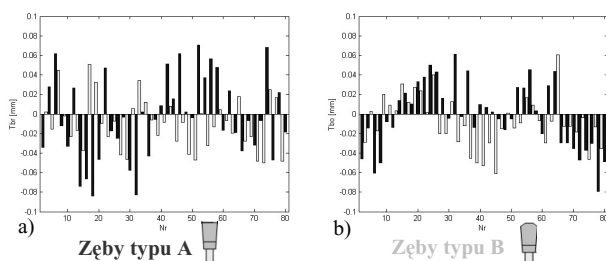
				
250 mm	30 mm	3.2 mm	2.5 mm	80



Rys. 12. Zdjęcie badanej piły
Fig. 12. Saw under test photograph

Tab. 2. Wyniki testu
Tab. 2. Test results

ΔR [mm]	D1 [°]	D2 [°]	D3 [°]
0.32	0.05	310.5	90.1



Rys. 13. Rozkłady bicia a) promieniowego i b) bocznego dla piły typu GA
Fig. 13. Radial and axial run-out distribution for the GA type saw

Uzyskane wyniki wykazały, że rozrzut bicia promieniowego i bocznego piły nie przekraczał $\pm 0,09$ mm.

4. Podsumowanie

Zaproponowana metoda umożliwia realizację bezstykowego pomiaru bicia pił tarczowych poprzez zastosowanie analizy fotogrametrycznej.

Ze względu na fakt użycia techniki obrazowej możliwa jest również automatyzacja procedur związanych zarówno z przygotowaniem stanowiska do pracy (procedura kalibracyjna), jak i jego eksploatacją (procedura pomiarowa). Opracowana procedura kalibracyjna niezależnie funkcjonowanie systemu

pomiarowego od konieczności posiadania dokładnych informacji o orientacji wewnętrznej (ogniskowe obiektywów, wymiary matryc detekcyjnych, położenie płaszczyzn przedmiotowych i obrazowych) modułów akwizycji obrazów K1 i K2. Efektem działania procedury są:

- odpowiednia orientacja zewnętrzna układów akwizycji obrazów;
 - wyznaczone parametry geometrii rzutowej;
 - współczynniki do algorytmu wyznaczającego współrzędne 3D.
- Zaproponowana procedura pomiarowa minimalizuje wpływ szeregu niekorzystnych czynników (dodatkové zniekształcenia piły, wady systemu mocowania piły) mogących mieć wpływ na końcowy wynik pomiarowy. Potencjalnie istnieje również możliwość identyfikacji rodzaju ww. czynnika.

Kolejną, istotną własnością zaproponowanego rozwiązania jest możliwość współpracy z dowolną platformą PC oraz niewielkie gabaryty modułu pomiarowego (model laboratoryjny - 110x90x60mm).

Uzyskany (w opracowanym modelu) zakres pomiarowy wyniósł 10 mm a rozdzielczość (modułów obrazujących) 0,02 mm. Zmianę zakresu pomiarowego można uzyskać poprzez odpowiedni dobór obiektywu i parametrów akwizycji, natomiast o rozdzielczości decyduje rozmiar pola widzenia obiektywu, jak i parametry stosowanej matrycy detekcyjnej.

Przeprowadzone badania testowe piły typu GA-5 250x30x3,2/2,5; z = 80 (udostępnionej przez Fabrykę Pił i Narzędzi z Wapienicy) przy zastosowaniu metody wykorzystującej ortogonalną konfigurację modułów obrazujących o ogniskowej $F = 3,5$ mm i matrycy detekcyjnej o rozdzielczości VGA pozwoliły oszacować wartości maksymalne (w stosunku do zęba odniesienia) na poziomie: $Tbr_0 = -105 \mu m$, $Tbo_0 = -110 \mu m$ odpowiednio dla bicia promieniowego i bocznego.

Wymagania na system pomiarowy określone przez producenta piły dostarczonej do badań były następujące:

- bicie promieniowe węglików w zakresie $0 \div 1,0$ mm;
- bicie boczne (osiowe) węglików w zakresie $0 \div 2,0$ mm;
- niezbędna dokładność pomiarowa to 0,01 mm.

Uzyskane w trakcie testów wyniki pomiarów nie zostały zweryfikowane z rzeczywistymi parametrami piły, gdyż firma nie dostarczyła swoich wyników badań.

Proponowane rozwiązanie daje możliwość automatyzacji szeregu procesów pomiarowych, a w efekcie i skrócenia czasu potrzebnego na przeprowadzenie procedury diagnostycznej. Zachowując ogólną ideę proponowanej metody pomiarowej można (poprzez odpowiednie modyfikacje stosunkowo prostej konstrukcji) realizować również inne zadania pomiarowe. Opracowane rozwiązania mogłyby uzupełnić (ewentualnie zastąpić) metody starszego typu, stając się tym samym cennym narzędziem diagnostycznym.

5. Literatura

- [1] Baszun P., Król H., Piszczek M.: Metoda pomiaru wybranych parametrów metrologicznych pił tarczowych z węglkami spiekanyimi przy zastosowaniu technik wizyjnych. *Diagnostyka*'3 (39)/2006, str.125 ÷ 130.
- [2] Białas S.: Specyfika geometrii wyrobów podstawą zapewnienia jakości na etapie projektowania. VI Sympozjum klubu POLSKIE FORUM ISO 9000 „Metrologia w systemach jakości – 3”. Kielce, 16 ÷ 18 październik 2000..
- [3] Nocuń M., Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa w systemach jakości produkcji. VI Sympozjum klubu POLSKIE FORUM ISO 9000 „Metrologia w systemach jakości – 3”. Kielce, 16 ÷ 18 październik 2000.
- [4] Ratajczyk E.: Procedury pomiarów przestrzennych i ich oprogramowanie komputerowe. II Szkoła – Konferencja „Metrologia wspomagana komputerowo”. T. 3. Zegrze k/Warszawy, 22 ÷ 25 maja 1995
- [5] Ratajczyk E.: Tendencje rozwoju współrzędnościowej techniki pomiarowej. VII Szkoła – Konferencja „Metrologia wspomagana komputerowo”. T. 1. Waplewo, 17 ÷ 20 maja 2005