

# Symulacja komputerowa pozycjonowania osi narzędzia w obróbce pięcioosiowej

## Simulation of positioning of the tool axis in five-axis machining

JAN BUREK  
RAFAŁ FLEJSZAR\*

Przedstawiono wpływ pozycjonowania osi narzędzia na dynamikę osi obrotowych obrabiarki w obróbce pięcioosiowej elementów o złożonej geometrii. Zaproponowano strategię płynnej zmiany pozycjonowania osi narzędzia w oparciu o krzywe offsetowe oraz zweryfikowano działanie strategii z użyciem wygenerowanego kod NC.

**SŁOWA KLUCZOWE:** obróbka pięcioosiowa, systemy CAM, obróbka powierzchni złożonych

*The work analyzed the impact of the positioning of the tool axis on the dynamics of the rotary axis of the machine in the five-axis processing of elements with complex geometry. A strategy for smooth change of positioning of the tool axis based on offset curves has been proposed, and verified using a NC code.*

**KEYWORDS:** 5-axis machining, CAM systems, complex surface machining

W przemyśle maszynowym coraz częściej stosuje się pięcioosiowe centra obróbkowe, które umożliwiają wykonywanie dowolnych powierzchni złożonych. Ważnym etapem w procesie produkcyjnym elementów o złożonej geometrii jest programowanie ścieżek narzędziowych, wspomagane przez systemy CAM. Najczęściej stosowaną technologią obróbki tego typu części jest kształtowanie powierzchni frezem kulistym. Metoda ta pozwala na wykonanie dowolnego typu powierzchni [1, 3].

Jednym z najbardziej istotnych czynników w procesie pięcioosiowego frezowania frezem kulistym jest pozycjonowanie osi narzędzia (rys. 1). Odbywa się to poprzez ruchy sterowanych osi obrotowych obrabiarki (kąt prowadzenia  $\alpha$ , kąt pochylenia  $\beta$ ). Masa poszczególnych elementów konstrukcyjnych suportów maszyny powoduje powstanie sił bezwładności, co jest przyczyną ograniczenia prędkości zmian kątów prowadzenia i pochylenia narzędzia [2, 4, 5].

Jest wiele wariantów technologicznych stosowanych zarówno do generowania ścieżek narzędziowych, jak i pozycjonowania osi narzędzia. W systemie CAM orientacja osi narzędzia może zostać zdefiniowana względem przedmiotu obrabianego albo konkretnego punktu przestrzeni czy konkretnej krzywej [6].

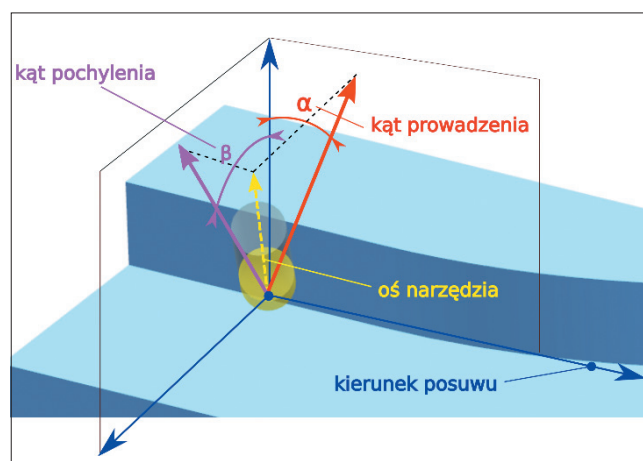
Wybór metody pozycjonowania osi na etapie programowania nie tylko ma konsekwencje czysto teoretyczne, ale także wpływa na dynamikę pracy obrabiarki. W przypadku elementów o złożonej geometrii często obserwowane są zmiany struktury geometrycznej powierzchni oraz odchyłki kształtu, związane ze zbyt dużą prędkością zmiany położenia poszczególnych osi. Problem jest zazwyczaj rozwiązywalny poprzez redukcję posuwu, jednak istnieje możliwość korekcy pozycjonowania osi narzędzia uzależ-

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.101>

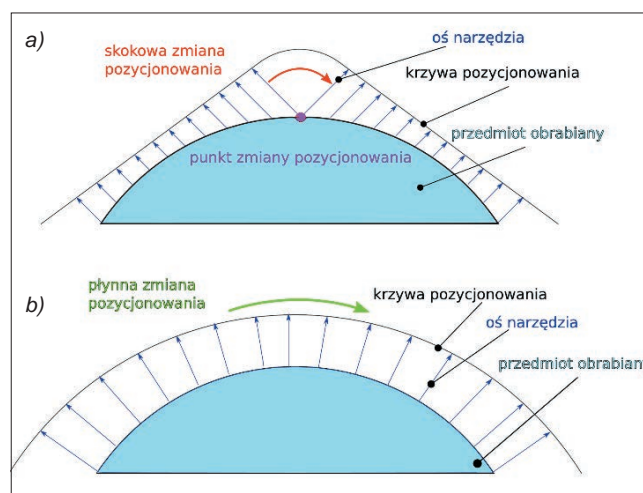
nionej od krzywej. Jej kształt ma bardzo duże znaczenie dla przebiegu procesu obróbkowego (rys. 2) [2, 5].

Często się zdarza, że wystąpienie odchyłki kształtu powierzchni jest zauważane dopiero na etapie obróbki. Istnieje jednak możliwość weryfikacji i korekcy dynamiki pozycjonowania już podczas projektowania procesu technologicznego, poprzez wprowadzenie płynnej zmiany kąta prowadzenia  $\alpha$  narzędzia. Zastosowanie korekcy pozwala na zmniejszenie maksymalnych prędkości obrotowych osi stołu maszyny. To z kolei skutkuje zachowaniem dokładności wymiarowo-kształtowych przedmiotu obrabianego bez redukowania posuwu.

Celem pracy było przygotowanie i zweryfikowanie strategii płynnego pozycjonowania osi narzędzia w pięcioosiowym wierszowaniu profilowym, z zachowaniem jak największej stabilności prędkości zmiany osi obrotowej stołu centrum obróbkowego.



Rys. 1. Pozycjonowanie frezu kulistego



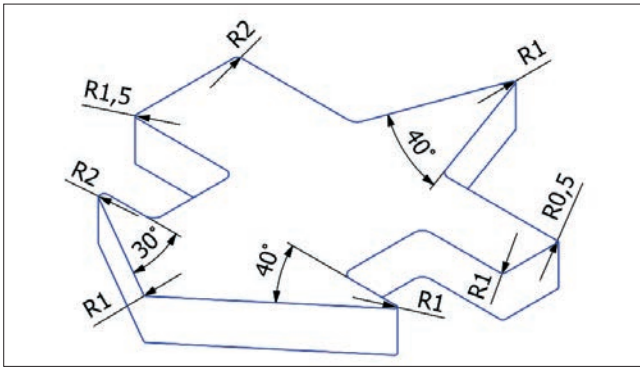
Rys. 2. Przebieg pozycjonowania osi narzędzia: a) ze skokową zmianą, b) z płynną zmianą

\* Dr hab. inż. Jan Burek prof. PRz (jburek@prz.edu.pl), mgr inż. Rafał Flejszar (r.flejszar@prz.edu.pl) – Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

## Badania symulacyjne

Badania przeprowadzono w systemie NX 11, na modelu przedmiotu testowego (rys. 3). Do badań wybrano model o takim kształcie, by znalazły się na nim powierzchnie wypukłe i wklęsłe o różnych wartościach promieni zaokrągleń.

Problem skokowej zmiany pozycjonowania osi narzędzia pojawia się głównie przy relatywnie małych wartościach promieni zaokrągleń, dlatego przyjęto, że naroża wklęsłe są wymiarowo zgodne z promieniem narzędzia obróbkowego.



Rys. 3. Model testowy

Badania polegały na symulacji wierszowania profilowego frezem kulistym o średnicy  $\varnothing 8$  mm. Przyjęto następujące parametry technologiczne: kąt pochylenia narzędzia  $\beta = 20^\circ$  i prędkość posuwu  $v_f = 2400$  mm/min.

Zaprogramowano obróbkę frezarską w centrum obróbkowym z osiami A i C w stole (stół uchylno-obrotowy). Badano zmianę położenia osi C stołu obrotowego w zależności od strategii pozycjonowania.

Wybrano dwie strategie prowadzenia osi:

- prowadzenie od części (rys. 4a) – strategia, w której kąt pochylenia  $\beta$  osi narzędzia ma stałą wartość względem części obrabianej, a kąt prowadzenia  $\alpha$  narzędzia ma stałą wartość równą 0,
- prowadzenie do krzywej (rys. 4b) – strategia, w której kąt prowadzenia  $\alpha$  osi narzędzia jest określany poprzez płaszczyznę normalną do zdefiniowanej krzywej, a kąt pochylenia  $\beta$  osi narzędzia, rozpatrywany w płaszczyźnie normalnej do zadanej krzywej, ma wartość stałą.

Krzywe pozycjonowania oparto na krzywej offsetowej od konturu modelu testowego (rys. 5a). Modyfikowano odległości środków zaokrągleń wypukłych i wklęsłych z założeniem, że nowo powstałe zaokrąglenie jest styczne do pierwotnej krzywej offsetowej. Przesunięcie środków zaokrągleń zostało wykonane w kierunku symetrycznym do dwóch sąsiednich ścianek modelu. W przypadku zaokrągleń wypukłych środek nowego zaokrąglenia znajdował się w odległości  $CX$  od środka zaokrąglenia wypukłego przedmiotu obrabianego (rys. 5b). W przypadku zaokrągleń wklęsłych zastosowano odsunięcie względem środka promienia zaokrąglenia wklęsłego przedmiotu obrabianego o odległość  $OFFSET + CV$  (rys. 5c).

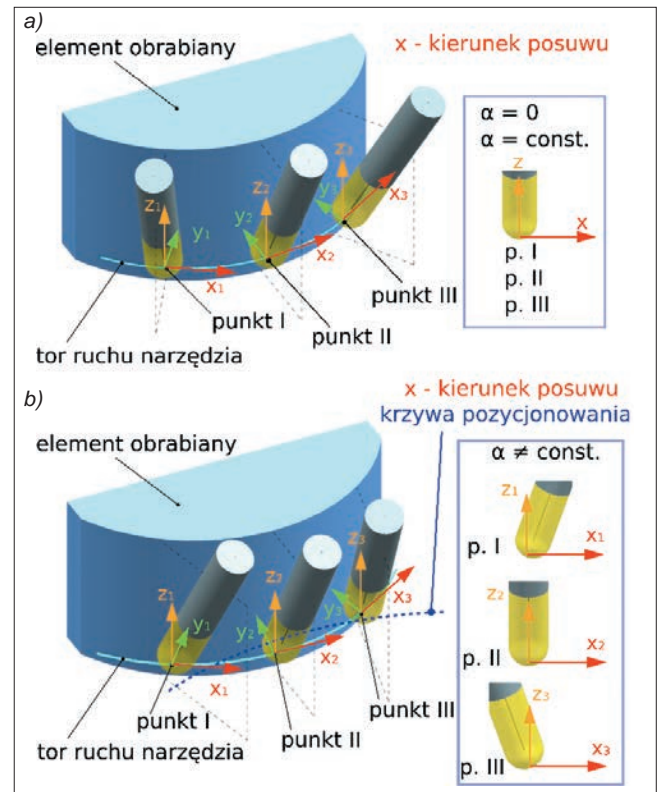
Geometria modelu testowego stanowiła ograniczenia dla parametrów  $OFFSET$ ,  $CX$  i  $CV$  (patrz tablica).

TABLICA. Ograniczenia modelu

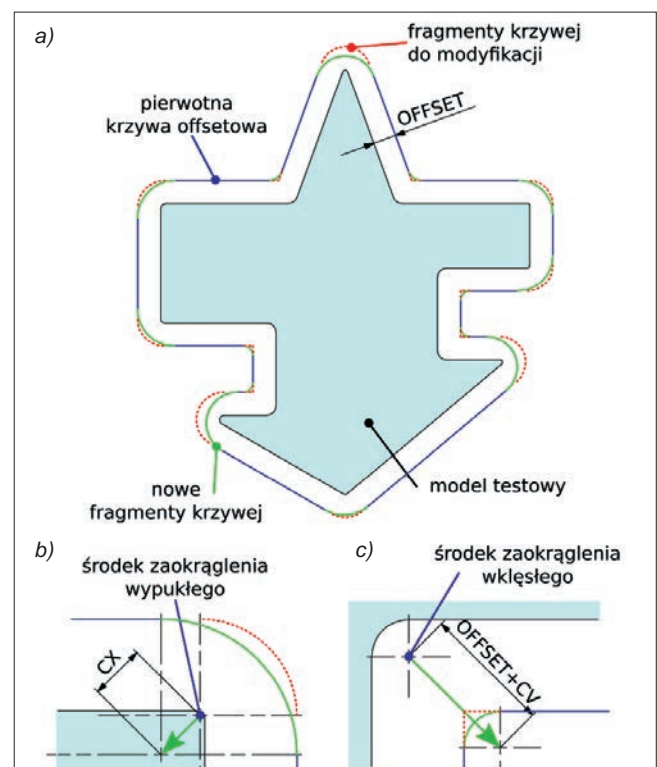
$OFFSET$ , mm	$\leq 10$
$CX$ , mm	$\leq 8$
$CV$ , mm	$\leq 12$
$CX + CV$ , mm	$\leq 14$

Te ograniczenia wynikały z założonego wymagania ciągłości  $G1$  krzywej offsetowej, kątów pomiędzy sąsiadującymi ściankami, promieni zaokrągleń naroży wklęsłych oraz minimalnego offsetu, poniżej którego ścieżki narzędziowe są generowane w sposób niepoprawny.

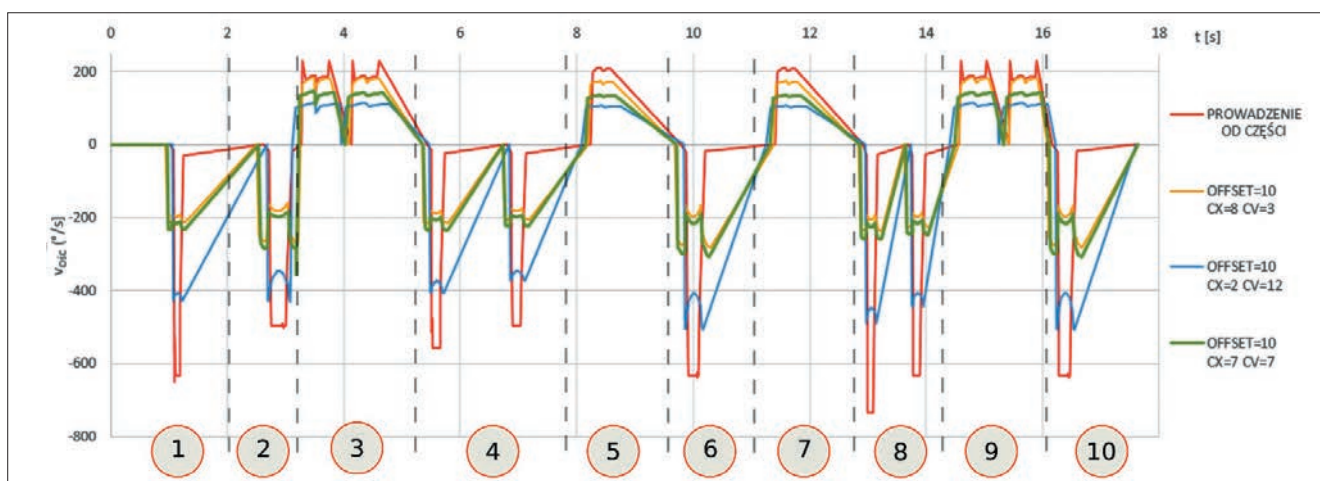
Wykonano symulację zmian położenia osi obrotowej C dla poszczególnych sposobów pozycjonowania, z wykorzystaniem różnych kombinacji parametrów  $OFFSET$ ,  $CX$  i  $CV$ .



Rys. 4. Strategie prowadzenia osi narzędzia: a) od części, b) do krzywej



Rys. 5. Krzywa offsetowa: a) widok ogólny, b) wymiarowanie zaokrągleń wypukłych, c) wymiarowanie zaokrągleń wklęsłych



Rys. 7. Wykres zmian prędkości osi obrotowej dla różnych strategii pozycjonowania osi w zależności od czasu obróbki

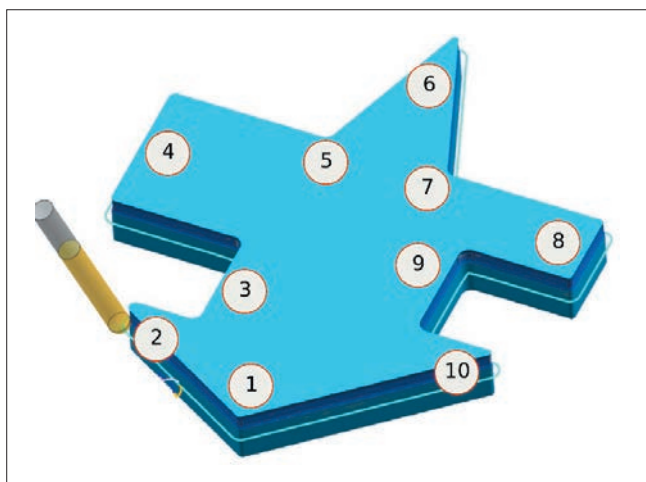
## Analiza wyników

W celu przeanalizowania wyników wydzielono obszary charakteryzujące się występowaniem zaokrągleń wklęsłych lub wypukłych (rys. 6). Na podstawie wygenerowanego kodu NC wykonano wykresy zmian położenia osi obrotowej  $C$  w zależności od czasu (rys. 7). Naniesiono na nich oznaczenia obszarów charakterystycznych.

Jako strategię odniesienia przyjęto obróbkę z pozycjonowaniem od części obrabianej, w przypadku której skokowa zmiana prędkości osi obrotowej okazała się bardzo wysoka – rzędu  $700^\circ/\text{s}$ . Widoczne jest również, że pozycjonowanie na narożach wypukłych stanowi dużo większy problem w porównaniu z pozycjonowaniem na narożach wklęsłych (skokowa zmiana prędkości jest o ponad 200% większa). Można przypuszczać, że po wdrożeniu programu obróbkowego wystąpiłyby błędy kształtu, zwłaszcza na zaokrągleniach wypukłych.

Wraz ze wzrostem wartości parametru  $CX$  (zwiększaniem zaokrąglenia wypukłego) spada prędkość kątowna osi  $C$ . Po zastosowaniu parametru  $CX = 8$  mm w obszarze 8 widoczny jest prawie trzykrotny spadek wartości badanej wielkości.

Wraz ze wzrostem parametru  $CV$  (zwiększaniem zaokrąglenia wklęsłego) również można zaobserwować spadek prędkości kątownej osi  $C$ . Jest on mniejszy niż w przypadku zaokrągleń wypukłych, mimo to po zastosowaniu parametru  $CV = 12$  mm zaobserwowano prawie dwukrotny spadek badanej wielkości.



Rys. 6. Obszary obróbki

Parametr  $OFFSET$  nie wpływał znacząco na wyniki badań, jednak jego dobór ograniczał możliwości wprowadzania pozostałych parametrów: zbyt duża wartość tego parametru ograniczała parametr  $CV$ , a zbyt mała – powodowała ograniczenia parametru  $CX$ .

Ograniczenia modelu uniemożliwiały dowolny dobór parametrów pozycjonowania, dlatego zweryfikowano różne kombinacje parametrów. Najlepsze wyniki otrzymano dla symetrycznego rozłożenia  $CX = CV = 7$  mm.

## Wnioski

Nowoczesne systemy CAM umożliwiają przewidywanie działania programu obróbkowego na rzeczywistej obrabiarce już na etapie projektowania procesu obróbkowego. Pozwala to na potencjalne skrócenie czasu wdrożeń i przebrożeń oraz zwiększenie stabilności pracy maszyny.

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że strategia pozycjonowania osi narzędzia w obróbce pięcioosiowej ma znaczący wpływ na dynamikę procesu obróbkowego.

W zależności od sposobu pozycjonowania możliwe jest osiągnięcie dużo mniejszych prędkości osi obrotowych, co może mieć zasadniczy wpływ na jakość wykonywanych elementów. Zmiana sposobu pozycjonowania pozwala na zwiększenie posuwu, który początkowo został zredukowany z powodu wystąpienia błędów geometrycznych.

Zaproponowana strategia pozycjonowania osiągnęła zamierzony cel. Udało się zmniejszyć prędkości obrotowe osi  $C$  na zaokrągleniach wypukłych (do ok. 60%) oraz na zaokrągleniach wklęsłych (do ok. 25%).

Problem optymalnego doboru parametrów oraz wpływu zaproponowanej strategii na parametry technologiczne procesu może być przedmiotem dalszych badań.

## LITERATURA

- Burek J., Żurek P., Żurawski K. „Wpływ kąta pochyleń na chropowatość powierzchni złożonych po obróbce frezem kulistym”. *Mechanik*. 10 (2016): s. 1478–1479.
- Grandguillaume L., Lavernhe S., Tournier C. “A tool path patching strategy around singular point in 5-axis ball-end milling”. *International Journal of Production Research*. 54, 24 (2016): s. 7480–7490.
- Lazoglu I., Manav C., Murtezaoglu Y. “Tool path optimization for free form surface machining”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 58, 1 (2009): s. 101–104.
- Sadilek M., Čep R., Budak I., Soković M., Kowalski J. “Aspects of using tool axis inclination angle”. *Strojnicki Vestnik*. 57, 9 (2011): s. 681–688.
- Wang N., Tang K. “Automatic generation of gouge-free and angular-velocity-compliant five-axis toolpath”. *Computer-Aided Design*. 39, 10 (2007): s. 841–852.
- Dokumentacja system NX 10.