Programowanie operacji frezowania ze zmienną orientacją osi narzędzia w układzie sterowania SINUMERIK 840D sl

Manual programming of milling operations with variable orientation of tool axis in SINUMERIK 840D sl numerical control system

MAREK KROK*

DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.5-6.56

Przedstawiono sposób programowania operacji frezowania ze **zmienną orientacją osi narzędzia względem powierzchni obrabianej z wykorzystaniem możliwości układu sterowania numerycznego SINUMERIK 840D sl produkcji firmy Siemens. Zaprezentowano podstawowe funkcje związane z kompensacją kinematyki obrabiarki oraz celowość jej stosowania. Opisano metody programowania orientacji narzędzia w przestrzeni roboczej obrabiarki. Dla lepszego zobrazowania poruszanych zagadnień podano również przykłady.**
SŁOWA KLUCZOWE: programowanie obrabiarek, programowanie orientacji narzędzia, kompensacja kinematyki obrabiarki

Described is the way of programming milling operations with variable position of tool axis in relation to the machined surface as has been made possible due to capacities of numerical control system SINUMERIK 840D sl offered by Siemens. This article presents basic functions related to compensation of the kinematics of the machine tool and its practical effects. The methods how to program the orientation of a tool within the work space of the machine are described. Some examples are shown for better illustration of the presented issues.
KEYWORDS: machine tool programming, variable tool axis programming, machine tool kinematic

Głównym celem obróbki ze zmienną orientacją osi narzędzia jest osiągnięcie wysokiej dokładności geometryczno-kształtowej obrabianej części z zapewnieniem wysokiej wydajności produkcji. Rosnące wymagania stawiane przez konstruktorów w wielu dziedzinach przemysłu – zmierzające m.in. do zachowania najlepszych właściwości w zakresie przepływu cieczy, ergonomiki użytkowania czy nawet wynikające ze względów estetycznych – powodują, że obrabiane powierzchnie stają się coraz bardziej skomplikowane, a jednocześnie zmniejsza się tolerancja ich wykonania. Model cyfrowy obrabianej cechy konstrukcyjnej zazwyczaj pochodzi z systemu CAD, natomiast program operacji jest generowany w systemie CAM na podstawie obliczeń geometrycznych i technologicznych. Proces generowania programu NC, polegający na adaptacji danych pośrednich do konkretnej obrabiarki z określonym układem CNC, jest często marginalizowany ze względu na ograniczenie możliwości wprowadzania zmian w postprocesorze przez technologa-programistę. Przekłada się to na postać kodu NC zdefiniowaną przez osobę opracowującą postprocesor, który nie zawsze jest optymalny w danym przypadku.

Powierzchnie, do których stosuje się obróbkę ze zmiennym nachyleniem osi narzędzia, można podzielić na trzy główne grupy:

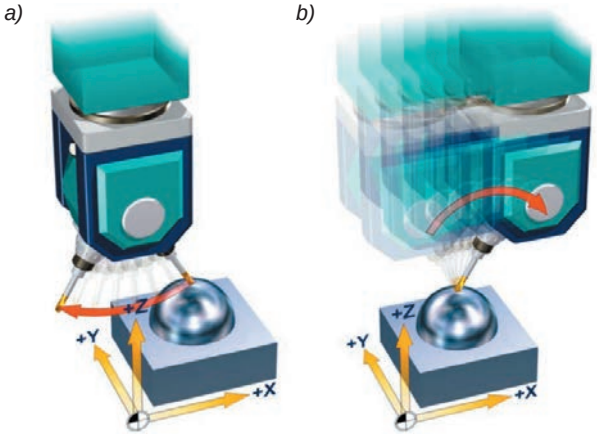
- powierzchnie swobodne (*free-form surfaces*) – występujące najczęściej w produkcji form wtryskowych,
- powierzchnie aerodynamiczne – spotykane w częściach silników lotniczych, takich jak łopatki czy wirniki,
- powierzchnie prostokreślne – obecne w częściach strukturalnych w postaci żeber lub innych wzmocnień.

Każda z tych grup wymaga innej konfiguracji funkcji sterujących pracą obrabiarki. Dobra znajomość tych funkcji jest kluczowa, aby odpowiednio przygotować program technologiczny – nieważne, czy powstaje on w sposób automatyczny (w systemie CAD/CAM), czy jest tworzony ręcznie przez programistę.

Kompensacja kinematyki

W celu ułatwienia pracy programiście i operatorowi obrabiarki producenci układów sterowania numerycznego wprowadzili funkcjonalność dynamicznej kompensacji kinematyki maszyny ze względu na symultaniczne przemieszczanie czterech lub pięciu osi (sześciu osi w przypadku specjalnych zastosowań, np. w obrabiarkach do kładzenia włókien laminatu). Najczęściej stosowana jest kompensacja pięcioosiowa.

W układzie sterowania SINUMERIK 840D sl kompensację kinematyki aktywuje funkcja TRAORI. Jej zadaniem jest odpowiednie przesunięcie suportów liniowych maszyny, tak aby podczas zmiany orientacji osi narzędzia poprzez ruch osi obrotowej obrabiarki koniec narzędzia pozostał w stałej zależności geometrycznej z układem współrzędnych obrabianego przedmiotu (rys. 1). Funkcja kompensacji rozdziela ruch kompensacyjny związany ze zmianą orientacji osi narzędzia od programowanego toru ruchu narzędzia tworzącego kontur przedmiotu obrabianego, eliminując konieczność wprowadzania kompensacji kinematyki na etapie postprocesingu [1].



Rys. 1. Zmiana orientacji narzędzia: *a*) bez aktywacji funkcji TRAORI, *b*) z aktywacją osi TRAORI [1]

* Mgr inż. Marek Krok (mkrok@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska

Kinematyka obrabiarki pięcioosiowej składa się z trzech osi liniowych: *X*, *Y*, *Z*, pracujących w układzie kartezjańskim prawoskrętnym, oraz dwóch dodatkowych osi obrotowych, które w zależności od przeznaczenia obrabiarki mogą być w różnej konfiguracji. Na potrzeby kompensacji kinematyki wyróżnia się trzy odmiany kinematyki pięcioosiowej:

- „P" – osie obrotowe znajdują po stronie stołu obrabiarki i ich ruch obrotowy przemieszcza przedmiot obrabiany w przestrzeni roboczej,
- „T" – osie obrotowe realizowane są przez wrzeciono, a ich ruch obrotowy wywołuje zmianę orientacji narzędzia w przestrzeni obrabiarki,
- „M" – kinematyka mieszana, gdzie jedna oś wywołuje obrót przedmiotu, a druga – zmianę orientacji narzędzia w przestrzeni roboczej obrabiarki.

Aby kompensacja kinematyki mogła działać poprawnie, w układzie sterowania muszą być zawarte informacje o typie kinematyki oraz wartości wektorów kompensujących w poszczególnych osiach. Dane te zapisywane są w parametrach maszynowych obrabiarki [2].

Metody programowania

W układzie sterowania SINUMERIK 840D sl można wyróżnić kinematycznie zależną i niezależną metodę programowania zmiany pochylenia osi narzędzia.

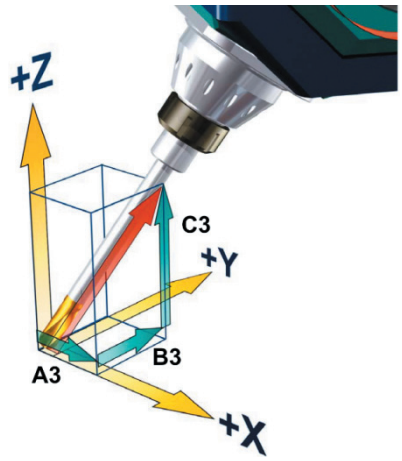
W metodzie **kinematycznie zależnej** (*machine-related orientation*) program technologiczny zawiera rzeczywiste wartości kątowe dla osi obrotowych (*A*, *B*, *C*) w danej obrabiarce. Na etapie generowania programu przez postprocesor wektorowa orientacja narzędzia jest tłumaczona na bezpośrednie wartości skrętu osi obrotowych. W takim przypadku program może być uruchomiony tylko na obrabiarce o kinematyce ściśle określonej w postprocesorze. Program zawiera jedynie dane związane z położeniem punktu kodowego narzędzia w układzie współrzędnych przedmiotu obrabianego (WCS) oraz wartości kątowe osi obrotowych w odniesieniu do maszynowego układu współrzędnych (MCS). Wadą tej metody jest konieczność posiadania dedykowanego postprocesora, który zawiera macierz transformacji kinematycznej, umożliwiającej zmianę danych pośrednich w postaci wektorowej na kinematycznie zależne wartości absolutne osi obrotowych. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość wykonania dokładniej symulacji pracy obrabiarki w celu sprawdzenia kolizyjności procesu z zastosowaniem postprocesora odwrotnego [1].

W metodzie **kinematycznie niezależnej** (*workpiece-related orientation*) program technologiczny zawiera wyrażoną wektorowo orientację narzędzia w układzie przedmiotu obrabianego (WCS). Program technologiczny może zostać uruchomiony na maszynach mających różne odmiany kinematyki. Do wygenerowania programu nie jest konieczny dedykowany postprocesor, a translacja orientacji narzędzia na fizyczne przemieszczenie osi obrotowych jest wykonywana przez układ sterowania. Program kinematycznie niezależny zawiera współrzędne punktu kodowego narzędzia oraz orientację wektora osi narzędzia wyrażoną jedną z kilku metod. Najczęściej orientację osi narzędzia wyraża się przez wektory jednostkowe, wirtualne kąty skrętu lub programowanie wektora normalnego do obrabianej powierzchni. Ponieważ nie programuje się bezpośrednich wartości przemieszczenia osi obrotowych, dla układu sterowania w przypadku redundantnej kinematyki obrabiarki dana orientacja narzędzia może mieć kilka poprawnych rozwiązań; nie jest możliwe przeprowadzenie analizy kolizyjności bez zastosowania takich narzędzi jak VNCK (Virtual NC Kernel) [1].

Programowanie orientacji narzędzia w układzie kinematycznie niezależnym

Układ sterowania SINUMERIK 840D sl oferuje wiele możliwości programowania orientacji narzędzia w przestrzeni roboczej obrabiarki. Nie sposób tutaj przedstawić wszystkich, dlatego omówione zostaną trzy najpopularniejsze.

Wektorową orientację narzędzia w układzie sterowania SINUMERIK 840D sl wyraża się poprzez słowa kluczowe *A3*, *B3*, *C3*, które opisują wektory jednostkowe osi, a kierunek narzędzia rzutowany jest odpowiednio na osie *X*, *Y*, *Z*. Kierunek wektora osi narzędzia jest zgodny z prostą wyznaczaną od punktu kodowego narzędzia w kierunku oprawki mocującej (rys. 2). Skala długości wektorów jednostkowych jest nieistotna, a kierunek określany jest na podstawie ich wzajemnej proporcji. Programowanie orientacji wektora jest instrukcją niemodalną; słowa niezaprogramowane w domyśle przyjmują wartość 0. Programowanie orientacji wektorowej jest zalecaną metodą programowania orientacji narzędzia, a dokładność określania wartości liniowych powinna wynosić minimum pięć miejsc po przecinku w układzie metrycznym oraz minimum sześć miejsc po przecinku w przypadku programowania orientacji wektora. Wysokie tolerancje dokładności podawania wartości osi i wektora wynikają z występowania błędów w operacjach matematycznych na liczbach zmiennoprzecinkowych, takich jak błędy zaokrągleń, obcięcia oraz niestabilność numeryczna [3].

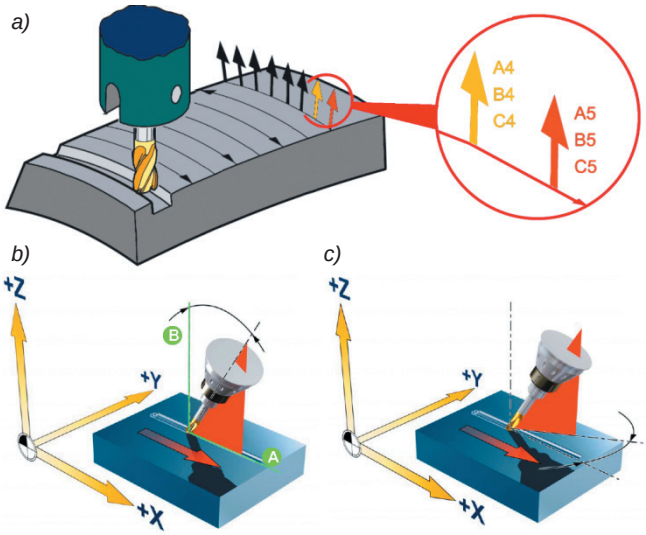


Rys. 2. Programowanie orientacji narzędzia poprzez wektory jednostkowe [1]

Druga popularna metoda programowania orientacji narzędzia opiera się na wykorzystaniu wirtualnych kątów skrętu poprzez słowa kluczowe: *A2*, *B2*, *C2*. W zależności od ustawienia funkcji przygotowawczych z grupy 50. kąty mogą być interpretowane m.in. jako kąty Eulera ORIEULER lub RPY (*roll pitch yaw*) ORIRPY. Kąty wirtualne transformują jeden układ kartezjański na drugi, a oś narzędzia jest zgodna z osią *Z* układu końcowego. Jeśli stosuje się kąty Eulera, w pierwszej kolejności wykonywany jest obrót układu względem osi *Z* o wartość kąta zawartego w *A2*, wyrażonego w stopniach. Tak transformowany układ jest obracany według nowego wektora *X'* o wartość *B2*. Kolejnym etapem jest obrót układu względem nowej osi *Z"* o wartość kąta *C2*. Z kolei w przypadku programowania kątów RPY obroty są wykonywane według osi *Z*, *Y'*, *X"* o wartości kątów odpowiednio: *C2*, *B2* i *A2*. Programowanie kątami wirtualnymi jest ograniczone w systemach CAM ze względu na konieczność stosowania specjalnych postprocesorów. Jednak ich zalety są

odczuwalne w przypadku programowania parametrycznego, gdzie kąty wirtualne są wynikiem zależności matematycznych opisujących powierzchnię krzywoliniową i można je zastosować bezpośrednio [3].

Trzecią najpopularniejszą metodą jest programowanie wektorem normalnym do obrabianej powierzchni poprzez słowa kluczowe: *A4*, *B4*, *C4*, *A5*, *B5*, *C5.* Słowa z indeksem 4 opisują wektor normalny do obrabianej powierzchni w punkcie startu bloku, natomiast z indeksem 5 – opisują wektor normalny na jego końcu. Domyślnie narzędzie ustawiane jest prostopadle do obrabianej powierzchni w trakcie interpolacji. Dodatkowo z zastosowaniem poleceń LEAD i TILT można programować wartość kąta wyprzedzenia i pochylenia względem obrabianej powierzchni, gdzie kąt wyprzedzenia jest interpretowany jako odchylenie osi narzędzia w kierunku posuwu, natomiast kąt pochylenia wyrażany jest w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku normalnego w punkcie styku narzędzia z przedmiotem obrabianym i mierzony jest od kierunku posuwu (rys. 3) [3].



Rys. 3. Programowanie obróbki czołowej (gdzie: *A* – kierunek posuwu, *B* – kierunek normalny do obrabianej powierzchni w punkcie stycznym): *a*) wektory styczne na początku i na końcu bloku, *b*) kąt wyprzedzenia LEAD, *c*) kąt pochylenia TILT [3]

Interpolacja wektorowa

Interpolacja liniowa toru narzędzia jednoznacznie określa pozycję punktu kodowego narzędzia w trakcie ruchu do kolejnej zaprogramowanej pozycji. Jeżeli jednocześnie zostanie zaprogramowana zmiana orientacji narzędzia w kolejnym zaprogramowanym bloku, wywołuje się płynne przejście z jednej orientacji do następnej. Zmiana orientacji narzędzia z zachowaniem interpolacji punktu charakterystycznego może się teoretycznie odbywać w dowolny sposób, dlatego – aby móc sterować trajektorią zmiany wektora reprezentującego oś narzędzia – układ sterowania SINUMERIK 840D sl udostępnia polecenia z 51. grupy funkcji przygotowawczych. Grupa ta zawiera wiele typów interpolacji, m.in. interpolację po pobocznicy stożka lub z dodatkową krzywą prowadzącą, jednak najczęściej wykorzystuje się ORIAXES i ORIVECT.

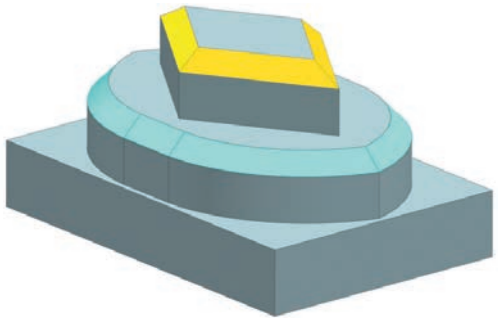
ORIAXES – osie obrotowe interpolowane są liniowo synchronicznie do toru narzędzia. W przypadku tej interpolacji wektorowej pośrednie pozycje w trakcie interpolacji zależą ściśle od kinematyki obrabiarki. Ta metoda nadaje się do obróbki frezami kulistymi, gdzie część walcowa nie bierze udziału w tworzeniu konturu obrabianej części. Ze względu na szybkość jest ona zalecana np. w obróbce matryc i stempli [1].

ORIVECT – w tej interpolacji oś narzędzia w trakcie zmiany pozostaje w płaszczyźnie utworzonej przez wektory narzędzia na początku i na końcu bloku zaczepione w jednym punkcie. Zmiana orientacji narzędzia jest precyzyjna i niezależna od kinematyki obrabiarki, jednak ze względu na konieczność wykonywania dodatkowych przemieszczeń korekcyjnych osi obrotowych jest wolniejsza. Znajduje ona zastosowanie w operacjach, gdzie pobocznica lub czoło frezu tworzy kontur części obrabianej – najczęściej w obróbce prostokreślnych powierzchni w przemyśle lotniczym [1].

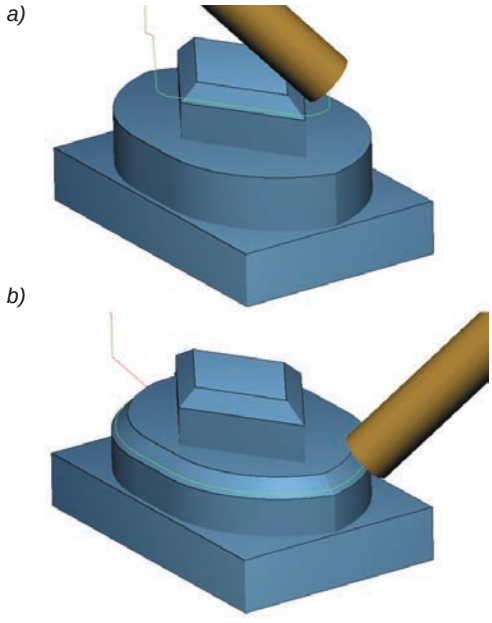
Przykład

Aby lepiej zobrazować opisane funkcje, zostanie przedstawiony przykład obróbki fazowania ze zmienną orientacją osi narzędzia części przedstawionej na rys. 4. Operacja składa się z obróbki zgrubnej wykonanej z użyciem cykli obróbki konturów (które nie zostały zamieszczone) oraz z obróbki dwóch zfazowań: żółtego (nr 1), które zostanie obrobione pobocznicą frezu, oraz niebieskiego (nr 2), które zostanie obrobione częścią czołową frezu. W programie zastosowano korekcję 3D narzędzia oraz umieszczono komentarze informacyjne o działaniu poszczególnych funkcji.

Na rys. 5 przedstawiono wynik symulacji obróbki w programie SinuTrain wersja 4.7 edycja 2.



Rys. 4. Przedmiot obrabiany z zaznaczonymi fazami



Rys. 5. Wynik symulacji obróbki faz: *a*) faza 1 – obróbka pobocznicą frezu, *b*) faza 2 – obróbka czołem frezu

```
N10 G0 G17 G40 G64 G90 G94 G54 ; Funkcje przygotowawcze
... ; Obróbka zgrubna
N190 T="CUTTER 10" D1
N200 M6
N210 S6000 M3 F1000
; Faza nr. 1: obróbka pobocznicą freza
N220 G0 Z30
N230 G0 X30 Y0 ; Dojazd do punktu startu
N240 G0 Z-3
N250 CUT3DC ; Aktywacja korekcji 3D
N260 TRAORI ; Aktywacja kompensacji kinematyki
N270 ISD=1 ; Obniżenie narzędzia wzdłuż osi
N280 ORIVECT ; Aktywacja interpolacji osi narzędzia
N290 G17 G90
N300 R0=SQRT(20*20+13*13) ; Parametr pomocniczy
N310 G0 X20 Y0 A3=-13 B3=-20 C3=R0 G42
N320 G1 X0 Y13
N330 A3=13 B3=-20 C3=R0
N340 X-20 Y0
N350 A3=13 B3=20 C3=R0
N360 X0 Y-13
N370 A3=-13 B3=20 C3=R0
N380 X20 Y0
N390 X30 Y0 G40 C3=1

; Faza nr 2: Obróbka czołem freza
N400 G0 Z30
N410 G0 X40 Y0
N420 G0 Z-3
```

```
N430 G1 Z-10
N440 TRAORI ; Aktywacja kompensacji kinematyki
N450 ISD=2.1 ; Obniżenie narzędzia wzdłuż osi
N460 ORIVECT ; Aktywacja korekcji 3D
N470 G17 G90
N480 OFFN=-4 ; Odsunięcie od zaprogramowanego konturu
N490 R0=SQRT(24*24+5.658*5.658) ; Parametr pomocniczy
N500 G0 G42 X29 Y0 A3=1 B3=0 C3=1
N510 G1 A3=24 B3=5.658 C3=R0
N520 G3 X5 Y19 I=AC(5) J=AC(-5.658) A3=0 B3=1 C3=1
N530 G1 X-5 A3=0 B3=1 C3=1 ;
N540 G3 X-29 Y0 I=AC(-5) J=AC(-5.658) A3=-24 B3=5.658
C3=R0
N550 G1 A3=-24 B3=-5.658 C3=R0
N560 G3 X-5 Y-19 I=AC(-5) J=AC(5.658) A3=0 B3=-1 C3=1
N570 G1 X5 A3=0 B3=-1 C3=1
N580 G3 X29 Y0 I=AC(5) J=AC(5.658) A3=24 B3=-5.658 C3=R0
N590 G1 G40 X40 Y0C3=1
N600 G0 Z100
N610 TRAFOOF ; Dezaktywacja kompensacji kinematyki
N620 M30
```

LITERATURA

1. Milling with SINUMERIK Mold making with 3 to 5-axis simultaneous milling, 09/2013, 6FC5095-0AB10-0BP3.
2. SINUMERIK 840D sl / 828D Job Planning, 10/2015, 6FC5398-2BP40--5BA3.
3. 840D sl SINUMERIK Operate 5-Axis-Workshop Technology Milling, 01/2016. Siemens TAC.