

Jarosław CHRZANOWSKI<sup>1</sup>

## **PROGRAMOWE ZWIĘKSZENIE DOKŁADNOŚCI WYKONANIA PRZEDMIOTU NA OBRABIARCE NC**

Systemy komputerowego wspomaganie wytwarzania oraz obrabiarki sterowane numerycznie otworzyły możliwości programowego wpływania na dokładność wymiarową wytwarzanych przedmiotów. Możliwe stało się osiągnięcie wysokiej wymaganej dokładności wykonania nawet na obrabiarce, która nie spełnia wymogów stawianych w normach dotyczących badania obrabiarek. W niniejszym artykule opisano metody i sposoby programowych modyfikacji, dokonywanych w trakcie procesu projektowania obróbki, zwiększające dokładność wykonania przedmiotu. Opisano również zagadnienia związane z niedokładnością obrabiarki w funkcji prędkości posuwu oraz metodę korekcji tej niedokładności.

### **1. WPROWADZENIE**

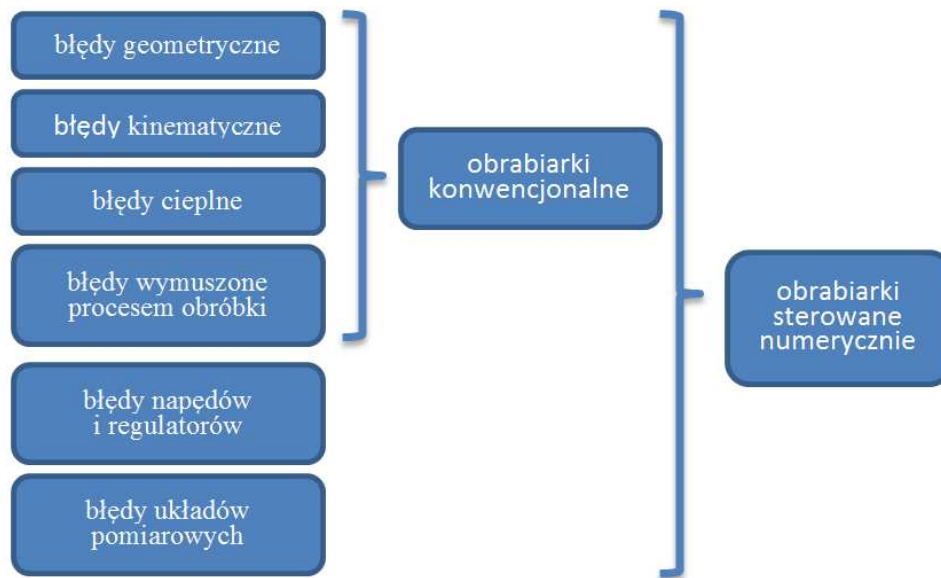
Upowszechnienie systemów CAD/CAM oraz duży udział obrabiarek sterowanych numerycznie zmieniają podejście do projektowania procesów wytwarzania praktycznie w każdej dziedzinie gospodarki. Komputerowo wspomagane generowanie programów NC, algorytmy i oprogramowanie PLC sterujące pracą obrabiarki, wprowadzają dodatkowe w stosunku do obróbki konwencjonalnej, możliwości poprawy dokładności wytwarzanych przedmiotów. Zadaniem obrabiarek NC jest obróbka przedmiotu według zaprogramowanej drogi przejścia narzędzia dla określonych parametrów obróbki. Stopień w jakim tor rzeczywisty będzie odpowiadał zaprogramowanemu określa dokładność obrabiarki. Dokładność obrabiarek badana jest zgodnie z normami w określonych odstępach czasu. Normy te opisują metody i przyrządy pomiarowe. Ogólnie wyróżniane są dwie podstawowe metody badań:

- pomiary bez obciążenia – gdy badana jest geometria, dokładność ruchów, bez wpływu sił skrawania,
- próba pracą – wynikiem testu są błędy wykonania przedmiotu wzorcowego.

Nie zawsze brane jest pod uwagę, że dokładność obrabiarki NC, zależy nie tylko od jej części mechanicznej, ale w dużym stopniu także od podzespołów elektronicznych, oprogramowania i dynamiki procesu. W stosunku do błędów obrabiarek konwencjonalnych dodatkowo występują błędy napędów i regulatorów oraz błędy układów pomiarowych (rys. 1).

---

<sup>1</sup> Zakład Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem, Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej



Rys. 1 Główne rodzaje błędów obrabiarek  
 Fig. 1 The main types of errors of machine tools

Znając przyczyny, miejsca powstawania i wartości błędów systematycznych można większość z nich skompensować. Obecnie, układy elektroniczne mogą kompensować błędy kinematyczne obrabiarki [1], czy też błędy powstające pod wpływem naprężeń termicznych [2-4]. Oznacza to, że w coraz większym stopniu elektronika, jej dostrojenie oraz oprogramowanie wpływają na dokładność wykonania obrabianych przedmiotów. Dlatego podejmowane są próby poprawy dokładności wykonania poprzez programową modyfikację toru przejścia narzędzia w stosunku do zarysu teoretycznego [5-7]. Taka modyfikacja, w zależności od przyczyny powstawania błędów, czy wynikają one z zastosowanego sposobu obróbki (np. obróbka wiotkich elementów), czy z niedokładności obrabiarki, może być przeprowadzona różnymi sposobami i w różnych miejscach procesu projektowania.

## 2. METODY PROGRAMOWEJ PORAWY DOKŁADNOŚCI OBRÓBKII

Dokładność obróbki ocenia się przez porównanie zgodności wykonania obrobionego przedmiotu z narzuconymi wymaganiami, co do tolerancji kształtu, wymiarów i położenia oraz jakości obrobionej powierzchni. Jak wcześniej napisano, w przypadku obrabiarek NC, kształt przedmiotu obrabianego zależy od zaprogramowanego toru oraz od oprogramowania układów elektronicznych sterujących zespołami obrabiarki. W związku z powyższym, można twierdzić, że przedmiot o zadanej dokładności może być możliwy do uzyskania na obrabiarce sterowanej numerycznie, która teoretycznie nie spełnia wymagań stawianych w normach dotyczących badania dokładności obrabiarek. Aby w przypadku obrabiarki „niedokładnej” osiągnąć podstawowy cel obróbki, czyli przedmiot o dokładności wymaganej przez konstruktora i narzuconej przez rysunek wykonawczy, muszą być spełnione co najmniej dwa warunki: błędy powodujące niedokładność są błędami

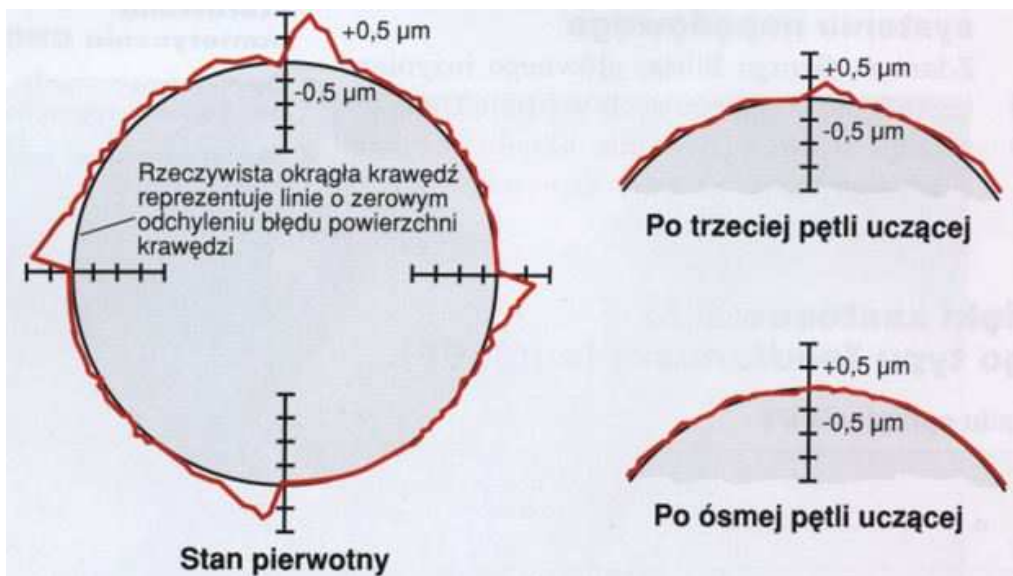
systematycznymi oraz możliwe jest określenie ich wartości. Przez zastosowanie algorytmu korekcji programowej można uzyskać przedmiot o wymaganej dokładności. Wartości liczbowe potrzebne do korekcji można określić przez:

- pomiary obrabiarki - określenie błędów obrabiarki,
- pomiary wykonanego przedmiotu –określenie błędów kształtu; (wpływa na nie zarówno dokładność obrabiarki jak i zastosowana technologia).

## 2.1 ZNANE I STOSOWANE METODY KOMPENSACJI BŁĘDÓW OBRABIARKI

Wśród znanych i stosowanych metod podwyższenia dokładności obróbki można wymienić w kolejności historycznej:

- korekcja i kompensacja, za pomocą układu sterowania, błędu wykonania skoku śruby, np. wartości z pomiarów błędu wprowadzane są do tabeli kompensacji (wydzielony obszar pamięci w układzie sterowania),
- korekcja i kompensacja, za pomocą układu sterowania, błędów powstających pod wpływem naprężeń termicznych, - metody bazujące na matematycznym modelu błędu w funkcji temperatury, mierzonej czujnikami rozmieszczonymi w obrębie struktury obrabiarki,
- korekcja błędów odchylenia od toru teoretycznego (rys.Rys. 2).

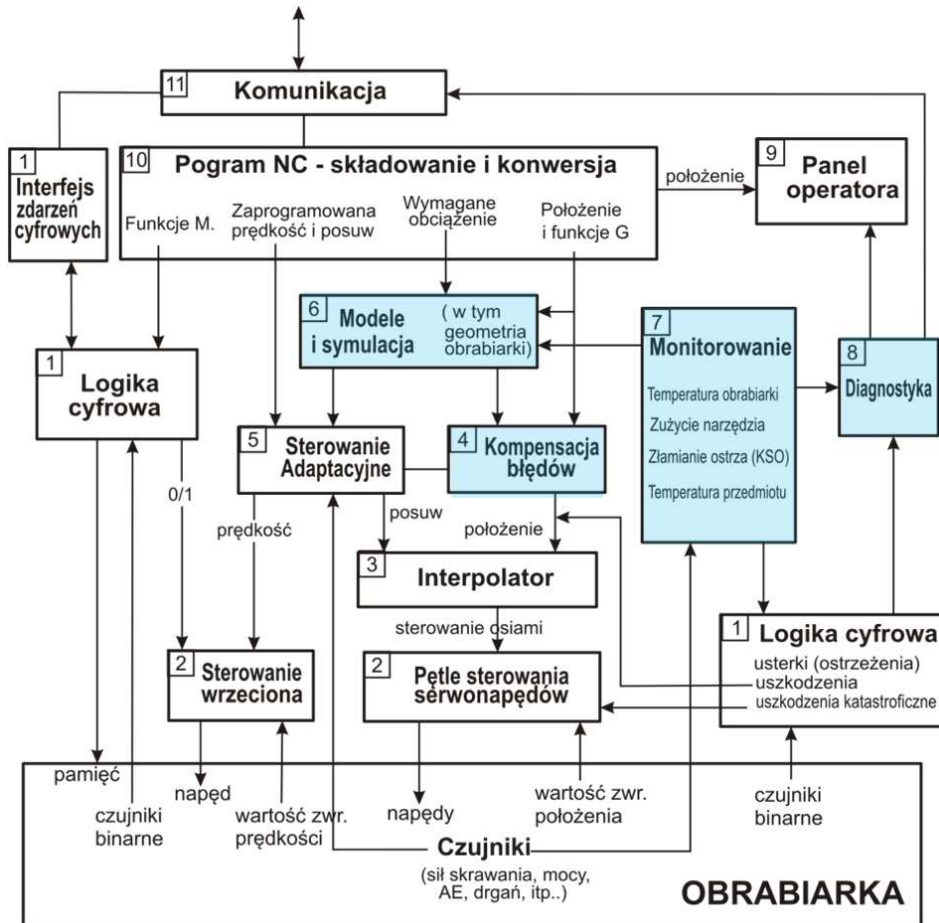


Rys. 2. Proces uczenia się układu automatycznej regulacji błędu obróbki krawędzi [8]

Fig. 2. The learning process of the automatic machining edge error control [8]

Zaawansowana funkcja nastaw w sterowniku cyfrowym bazuje na automatycznym uczeniu się układu i dążeniu do maksymalnej redukcji strat w układzie napędowym. W pokazanym powyżej zabiegu obróbki standardowy błąd obróbki, wynikający ze strat w ruchu silnika (luzy, sprężystość), eliminowany jest przez układ po ośmiu pętlach uczących [8].

Rozwój układów sterowania powoduje, że coraz częściej i chętniej stosowane są układy monitorowania i diagnostyki stanu obrabiarki. Przykład takiego układu zaprezentowano na rys. 3



Rys. 3. Układ sterowania CNC  
Fig. 3. CNC control unit

## 2.2 NIEDOKŁADNOŚĆ WYMIAROWA PRZEDMIOTU WYNIKAJĄCA Z PROCESU OBRÓBK

Przykładem niedokładności wykonania przedmiotu wynikającej z procesu obróbki, może być przypadek obróbki długich cienkich żeber. Siły skrawania podczas obróbki powodują odpychanie materiału obrabianego od narzędzia, co powoduje pozostawienie nadmiarowego materiału, a w konsekwencji niepożądaną niedokładność wykonania. Na rys. 4 przedstawiono schematycznie powstawanie zniekształcenia obrabianego żebra. Po obróbce zgrubnej żebro jest jeszcze na tyle sztywne, że możliwe jest przeprowadzenia obróbki wykończeniowej pierwszej strony, bez zniekształcenia zarysu. Natomiast przy prowadzeniu obróbki wykończeniowej drugiej strony materiał pod wpływem sił skrawania zostaje ugięty, im większa jest odległość od ścianek porzecznych zarysu, tym oczywiście większa wiotkość i związana z tym większa wartość ugięcia.

Dobre rezultaty podwyższenia dokładności (eliminacji nadmiarowego materiału) osiągnięto stosując korekcję programu NC [9].



Rys. 4. Problemy przy obróbce cienkiego żebra  
Fig. 4. Problems with the machining of thin rib

Przed obróbką wykończeniową drugiej strony, zalecane jest pozostawienie podwójnej wartości naddatku. Przeprowadzenie obróbki z parametrami i w warunkach jak dla zaplanowanej obróbki wykończeniowej pozostawiając tym razem pojedynczy naddatek. Wykonanie pomiarów błędów kształtu np. sondą przedmiotową [10]. Zmiana drogi przejścia narzędzia w systemie CAM z linii prostej na krzywą wyliczoną na podstawie pomiarów nadmiarowego materiału. Wykonanie obróbki wykończeniowej wg zmienionej trajektorii narzędzia.

### 2.3 BADANIA I KOMPENSACJA WPŁYWU DOKŁADNOŚCI DYNAMICZNEJ

W celu zwiększenia wydajności obróbki i związanym z tym stosowaniem nowoczesnych materiałów narzędziowych, obróbek szybkościowych i wydajnościowych, wzrasta dynamika nowoczesnych procesów wytwarzania, a dokładność dynamiczna coraz częściej odgrywa istotną rolę w procesie skrawania. Dokładność dynamiczna, rozumiana jest jako dokładność obrabiarki w funkcji parametrów obróbkowych, głównie prędkości posuwu. To ona decyduje przede wszystkim o dokładności przedmiotu obrabianego, a szczególnie w przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie o stopniu odwzorowania zaprogramowanej drogi przejścia narzędzia w stosunku do drogi rzeczywistej wykonywanej przez to narzędzie.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że to dynamika procesu w znacznie większym stopniu niż np. siły skrawania, wpływa na dokładność wykonania przedmiotu. W większości przypadków próby prowadzenia obróbek szybkościowych na obrabiarkach NC do tego nie przystosowanych (starszego typu), skazane są na niepowodzenie ze względu na małą dokładność takiego procesu. Standardowa obrabiarka CNC pomimo możliwości dynamicznych, układ elektroniczny ma dostrojony w zakresie standardowych prędkości posuwu. Na takiej obrabiarce przybliżenie prędkości posuwu do wartości właściwych dla HSM powoduje zniekształcenie toru ruchu widoczne głównie przy zmianach kierunku. Jest to błąd dynamiczny, który ujawnia się dopiero podczas pracy maszyny i jest związany

z niedoskonałością interpolatora i napędów. Serwonapędy pracują w tzw. zamkniętej pętli sterowania położeniem (sprzężenie zwrotne położenia). Regulator w serwonapędzie ciągle stara się tak sterować silnikiem, aby błąd pozycji (różnica pozycji zadanej i aktualnej) był jak najmniejszy. Serwonapęd nie może zareagować na uchyb położenia natychmiast, potrzebuje na to tyle czasu ile wynosi okres regulatora położenia. Jeżeli w większości serwonapędów suma opóźnień podczas cyfrowego przetwarzania sygnału w regulatorze położenia wynosi ok. 0,0025s, to gdy uchyb zwiększy się zaraz po dokonaniu pomiaru położenia, maszyna w takim czasie przy prędkości 10000mm/min przejdzie 0,42mm. Tak duży błąd przekracza sumę statycznych błędów geometrii maszyny. Z tego powodu producenci obrabiarek NC bardzo rzadko informują o dynamicznych parametrach produkowanych maszyn.

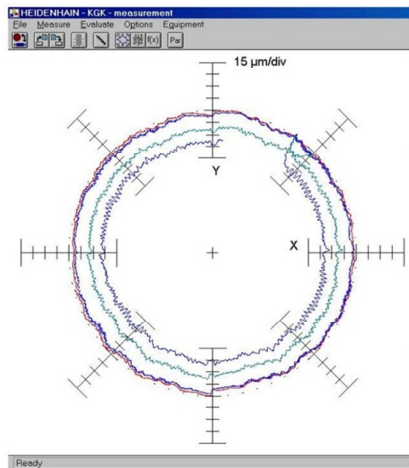
Równie istotna jest jakość zadawania pozycji, czyli interpolacja. Interpolator jest prostą maszyną matematyczną (np. blokiem funkcjonalnym w PLC), której zadaniem jest obliczanie współrzędnych punktów pośrednich toru narzędzia, leżących pomiędzy punktami określonymi w programie pracy obrabiarki. Najważniejszym zadaniem interpolatora jest synchronizacja ruchów wszystkich osi, tak aby tor narzędzia w przestrzeni był zgodny z programem NC. Jest to złożony proces, który dla osiągnięcia zadowalającej rozdzielczości wymaga szybkich procesorów i przy dużych prędkościach posuwu może powodować błędy ruchu.

Z przeprowadzonej analizy literatury wynika, że stosunkowo mało pozycji poświęcono badaniom dokładności dynamicznej. Autorzy różnych publikacji, pod pojęciem dynamiki obrabiarek przeważnie opisują wpływ drgań w układzie OUPN (obrabiarka – uchwyt – przedmiot obrabiany – narzędzie) na proces skrawania. Poza badaniami laboratoryjnymi praktycznie nie są wykonywane testy dokładności dynamicznej dla dużych różnic wartości prędkości posuwów obrabiarki.

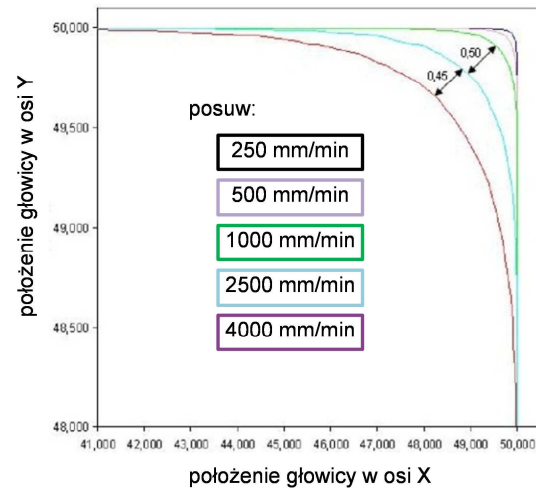
Problem dokładności dynamicznej, pojawia się na przykład przy planowaniu operacji obróbki wykończeniowej. Szczególnie przy obróbce wykończeniowej powierzchni krzywoliniowych, gdy droga przejścia narzędzia, dla osiągnięcia narzuconej chropowatości powierzchni jest długa (kilkanaście metrów) a naddatek liczony jest w dziesiątych częściach milimetra.

W Zakładzie Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem PW przeprowadzono badania wpływu dokładności dynamicznej na zniekształcenie zaprogramowanej drogi przejścia narzędzia. Badania przeprowadzono na centrum frezarskim Cincinnati Arrow 500. Wartości maksymalnych prędkości posuwu stosowanych przez operatora wynosiły do 500mm/min. Postanowiono sprawdzić dokładność odwzorowania zaprogramowanego toru przy wyższych wartościach posuwu - do 4000mm/min. Przeprowadzono pomiary wykorzystując siatki dyfrakcyjne urządzenia KGM 101 firmy Heidenhain. Wykonano standardowe testy okrągłości (rys. 5), a następnie zostały wykonane pomiary przy różnych kształtach torów ruchu głowicy. Zaprogramowano między innymi: tor kwadratowy, ośmiokątny, tor o kształcie przebiegu prostokątnego, przy różnych długościach boków, oraz fragmenty łuków o różnych promieniach. Przy zadanym torze o kształcie kwadratu, największe odchylenia od drogi zaprogramowanej wystąpiły w narożach – zostały one zaokrąglone, a stopień zniekształcenia toru wzrastał wraz ze zwiększaniem prędkości posuwu (rys. 6). Po analizie danych, zauważono, że zaokrąglenia te nie są symetryczne

względem przekątnej kwadratu, co było najprawdopodobniej spowodowane różną wartością przyspieszeń dodatnich i ujemnych, odpowiedzialnych za rozpędzanie i hamowanie układów napędowych poszczególnych osi.

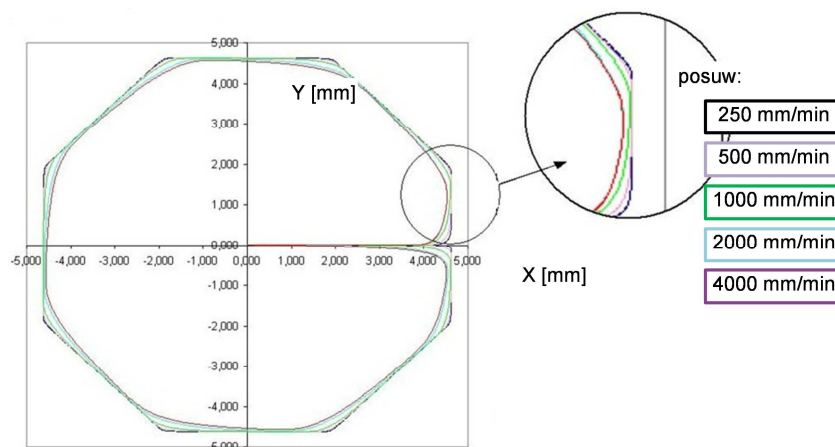


Rys. 5. Wyniki testu okrągłości przy różnych prędkościach posuwu  
Fig. 5. The circle test result at different speed of feed rate



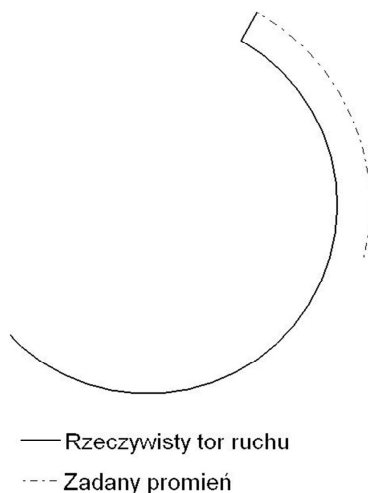
Rys. 6. Prawe górne naroże kwadratu przy różnych prędkościach posuwu  
Fig. 6. Upper right corner of the square at different feed rates

Wyniki testów pozostałych torów były bardzo podobne. Zniekształcenia (błędy dynamiczne) wykonywanego toru względem zaprogramowanego, pojawiały się jedynie w miejscach, w których występowała nagle zmiana kierunku ruchu. W skrajnych przypadkach, gdy prędkość posuwu wynosiła 4000mm/min a długości zadanych odcinków były mniejsze niż 5mm, po analizie danych okazało się, że wykonany kształt nie miał żadnego odcinka prostego (rys. 7). Tor składał się wyłącznie z łuków. Oglądając wykres obrazujący wykonaną drogę wrzeciona względem stołu, bardzo trudno byłoby odgadnąć jaka ścieżka została zaprogramowana.



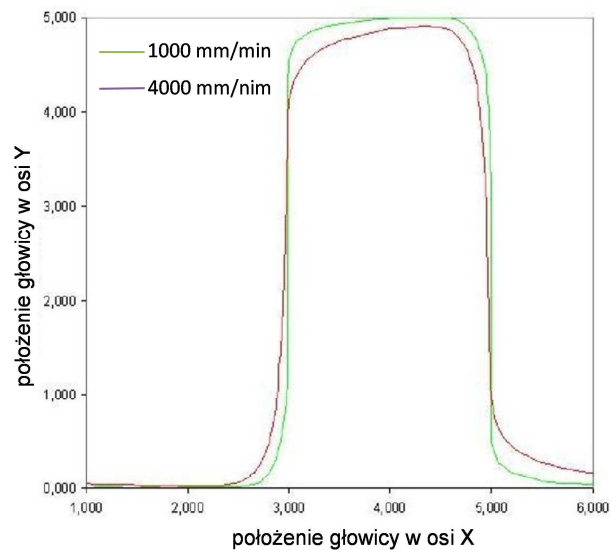
Rys. 7. Rzeczywisty tor narzędzia podczas wykonywania ośmiokąta przy różnej prędkości ruchu posuwowego  
Fig. 7. The actual tool path while performing octagon at different feed rate

Analizując wyniki testów z torem w kształcie łuków o różnych promieniach, stwierdzono, iż wraz ze wzrostem prędkości posuwu zwiększony zostaje wykonywany promień. Przy dużych prędkościach posuwu widać było, że stół obrabiarki po wykonaniu zniekształconego – zmniejszonego łuku powraca do końcowej pozycji zadanej (na wykresie, przy końcu łuku pojawia się prosty fragment toru współliniowy z promieniem). Takie zachowanie układu może świadczyć o problemach z niedostateczną prędkością przetwarzania danych. Na końcu drogi, gdy powinno nastąpić zatrzymanie posuwu, układ sterowania sprawdza osiągnięcie współrzędnych zaprogramowanych i najkrótszą drogą zjeżdża na nie. Kąt  $45^\circ$  sugeruje takie samo opóźnienie w obu osiach X i Y.



Rys. 8. Zarejestrowany tor ruchu w czasie wykonywania łuku CCW

Fig. 8. The path of the movement registered during the performance of CCW arc



Rys. 9. Rzeczywisty tor narzędzia podczas wykonywania przebiegu prostokątnego przy różnych prędkościach ruchu posuwowego

Fig. 9. The actual tool path during the course of a rectangular shape at different feed rates

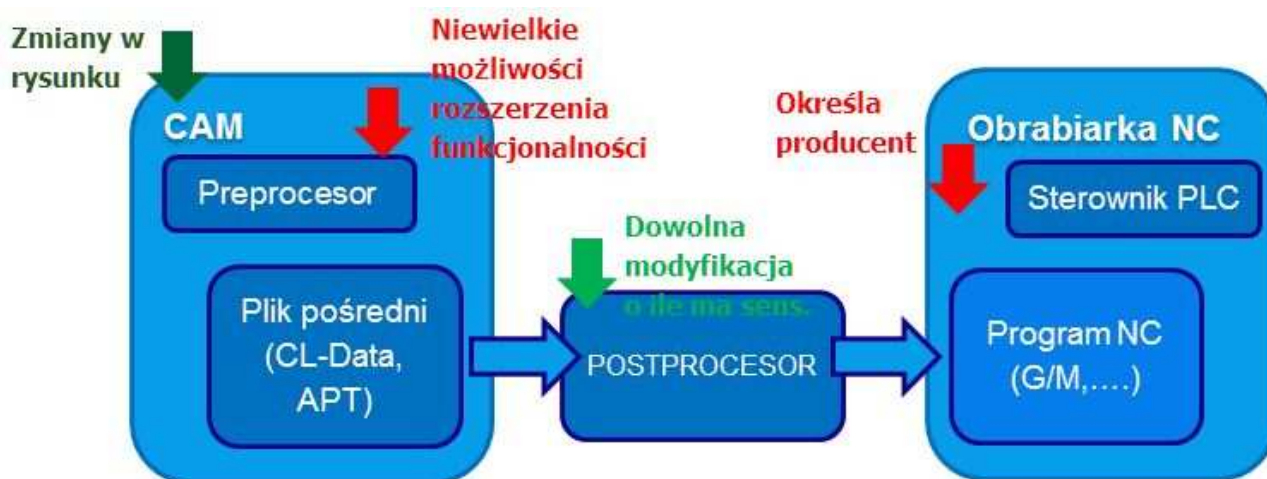
Analizując wykres drogi, zarejestrowany podczas badań KGM w trakcie wykonywania toru o kształcie przebiegu prostokątnego (boki pionowe o długościach 5mm, poziome 2mm) widać, że układ napędowy osi X przy dużych prędkościach posuwu pracował cały czas bez zatrzymywania, nawet gdy zaprogramowano tylko ruch w osi Y (narastające i opadające zbocza na rys. 9). Ponadto, skrajne zadane położenia na pionowych bokach zaprogramowanego prostokąta (narożniki – rys. 9), nie zostały osiągnięte. Zarejestrowany przebieg wyraźnie pokazuje znaczne zniekształcenie rzeczywistej drogi względem toru zadanego. W przypadku zaprogramowania jeszcze krótszych odcinków można spodziewać się uzyskania kształtu zbliżonego bardziej do sinusoidy niż do przebiegu prostokątnego. Kilukrotne powtórzenie testu przy zadanej prędkości ruchu dawało podobne wyniki. Powstała koncepcja, aby znając wartości niedokładności odwzorowania drogi narzędzia przy zadanej prędkości, próbować skompensować je programowo. Można zmienić nastawy regulatorów lub algorytmy sterujące, jednakże wymaga to dostępu do danych maszyny



z uprawnieniami serwisu. Taka zmiana przez ingerowanie w oprogramowanie producenta obrabiarki jest niebezpieczna (uszkodzenie maszyny) i ogólnie niezalecana. Jest praktycznie niemożliwa do przeprowadzenia na obrabiarce produkcyjnej w zakładzie przemysłowym. Można ten sam cel osiągnąć znacznie łatwiej i bezpieczniej dokonując zmian w programie NC. Modyfikacji można dokonać na różnych etapach generowania programu NC. Poniżej podano możliwości programowej kompensacji błędów.

#### 2.4 MIEJSCE WPROWADZENIA KOMPENSACJI

Na schemacie typowego przebiegu procesu komputerowego wspomaganie programowania obrabiarek NC (rys. 10) zaznaczono możliwe miejsca wprowadzenia programowej modyfikacji, wpływającej na dokładność przedmiotu wytwarzanego.

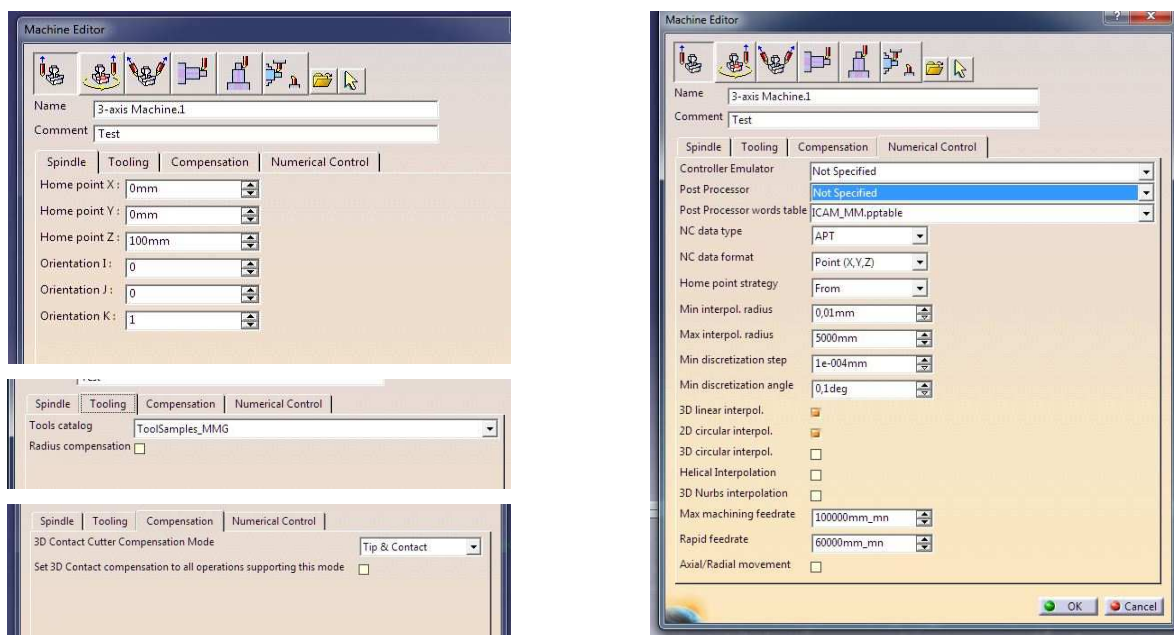


Rys. 10. Tok przygotowania programu NC  
Fig. 10. The schedule of preparing NC code

Sposób i możliwości kompensacji zależą głównie od przyczyny powstawania błędu, ale także od technicznego zaawansowania posiadanych zasobów w danym przedsiębiorstwie: obrabiarek i systemu CAM.

Pomimo że, programowej kompensacji błędów można dokonać w różnych miejscach procesu przygotowania programu NC, to jako zasadę trzeba przyjąć, że nie powinno się ingerować w oprogramowanie obrabiarki, które jest dostarczone przez producenta a niedostępne dla użytkownika maszyny. Jakikolwiek samodzielne zmiany w algorytmach sterujących, zmiany nastaw czy wartości współczynników wzmocnień regulatorów, wymagają znajomości zasad działania układu sterowania obrabiarki, haseł dostępu do danych maszynowych i zgody producenta. Jak wynika z doświadczeń zespołu badawczego, producenci układów sterowania nie pozwalają na ingerencję w oprogramowanie i dołączenie czy zmiana jakiegokolwiek funkcji (np. obsługującej urządzenie pomiarowe) nie jest zwykle możliwa do zrealizowania.

Korzystniejsze wydają się być inne możliwości korekcji trajektorii ruchu. Zwykle, na początku projektowania technologii w systemie CAM wybierany jest preprocesor. Zawiera on niezbędne informacje o obrabiarce. Preprocesor konfigurowany jest najczęściej jako odpowiedzi na standardowe pytania lub w formie tabelarycznej (rys. 11). Użytkownik określa typ maszyny, ilość, oznaczenia oraz ruchy sterowanych osi, dopuszczalne wartości prędkości ruchu, ilość gniazd magazynu i czas wymiany narzędzia, bibliotekę narzędzi, wymiary przestrzeni roboczej. Preprocesor mógłby stanowić doskonałe miejsce do wprowadzenia informacji o współczynnikach kompensacji toru, gdyby nie jego ograniczona przez producenta funkcjonalność.



Rys. 11. Informacje o obrabiarce wprowadzane do systemu CATIA  
Fig. 11. Machine tool data in CATIA system

Zmiany w rysunku jako metoda poprawy dokładności obróbki są stosowane, jednak podstawową wadą takiego podejścia jest jego mała uniwersalność. Ten sam przedmiot może być, w zależności od obciążenia parku maszyn, wykonywany na różnych obrabiarkach. Podczas przygotowywania technologii w dużych zakładach produkcyjnych najczęściej wiadomo na jakim typie maszyny będzie wykonywany przedmiot, natomiast program NC jest generowany na tą obrabiarkę, która w danej chwili jest najmniej obciążona, a jej możliwości technologiczne umożliwiają zaprogramowaną obróbkę. W przypadku prób modyfikacji przez zmianę rysunku, należy pamiętać, że zmodyfikowany rysunek oraz program wygenerowany na tej podstawie nie może być uruchomiony na innej obrabiarce niż ta, na której dokonano pomiarów i przygotowano modyfikacje. Inna obrabiarka, nawet tego samego typu i producenta, to inna sztywność, inna geometria inna dokładność. Problemem w tym przypadku jest również archiwizacja i przechowywanie danych. Trzeba zachować wersję niemodyfikowaną i tyle modyfikacji na ilu obrabiarkach był obrabiany przedmiot.

Najbardziej obiecującym miejscem wprowadzenia modyfikacji programowych jest etap przetwarzania postprocesorem pliku CL-data. Postprocessor jest programem tłumaczącym wewnątrz, zależny od systemu CAM format zapisu drogi narzędzia na program NC w określonym formacie. Postprocessor powinien być przygotowany dla każdego typu i rodzaju układu sterowania jakie są w danym przedsiębiorstwie. Może być napisany w dowolnym języku programowania. Większość producentów systemów CAM oferuje generatory postprocesorów. Plik taki operuje na zmiennych, funkcjach i procedurach. Przykładowy fragment pliku postprocesora przedstawiono na rys. 12.

```
ptlchg0 #Call from NCI null tool change (tool number repeats)
pcuttype
pcom_moveb
c_mmlt #Multiple tool subprogram call
comment
pcan
pbld, n, sgplane, e
pspindchg
pbld, n, scoolant, e
if mi1 > one & workofs <> prv_workofs,
[
sav_absinc = absinc
absinc = zero
pbld, n, sgabsinc, pwcs, pfxout, pfyout, pfzout, pfcout, e
pe_inc_calc
```

Rys. 12. Przykład funkcji - postprocesor Mastercam  
Fig. 12. Function example – Mastercam postprocessor

Postprocessor jest miejscem na tyle otwartym i uniwersalnym, że daje możliwość wprowadzenia korekcji dowolnego błędu. Oczywiście, należy uwzględnić tylko te wartości które mają sens. Nie warto wprowadzać informacji, które są zależne od trudnych do przewidzenia warunków obróbki np. temperatury, miejsca mocowania przedmiotu obrabianego. Natomiast kompensację błędów zależnych od dynamiki ruchu można wprowadzić np. w postaci znanej funkcji lub w postaci tabelarycznej, gdy wartości odchylenia toru nie są skorelowane z prędkością ruchu.

### 3. PODSUMOWANIE

W artykule opisano metody i sposoby podwyższenia dokładności wykonania przedmiotu przez zastosowanie modyfikacji programowych. Określono miejsca, zakres i możliwości wprowadzenia modyfikacji podczas przygotowywania programu NC. Wyjaśniono pojęcie dokładności dynamicznej i opisano badania zniekształcenia toru wykonywanego przez obrabiarke w stosunku do toru zaprogramowanego. Następnym etapem planowanych prac jest praktyczne wdrożenie programowej korekcji drogi przejścia

narzędzia, w celu podwyższenia dokładności wykonywanego przedmiotu. Koncepcja wypracowana przez zespół polega na pomiarach dokładności dynamicznej danej obrabiarki, przy wykorzystaniu interferometru laserowego, DBB oraz KGM 101. Na podstawie danych z pomiarów i uproszczonego modelu napędu zostaną opracowane algorytmy wyliczające wartości korekcji toru, które następnie będą zapisane w oddzielnym pliku przeznaczonym dla danej obrabiarki. Dane z pliku pobierane będą przez postprocesor podczas konwersji CL-data na kody sterujące obrabiarką.

Zaproponowana metoda jest unikalna i wydaje się być obiecująca. Dalsze badania wykażą czy stanowi ona istotny etap w podwyższaniu dokładności wykonania przedmiotów na obrabiarkach NC.

*Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

#### LITERATURA

- [1] XIAOQIANG T., JINSONG W., MEN G., 2005, *Kinematic calibration of gantry hybrid machine tool based on estimation error and local measurement information*. Int. J. Adv. Manuf. Technol, 26, 382-390.
- [2] LI S., ZHANG Y., ZHANG G., 1997, *A study of pre-compensation for thermal errors of NC machine tools*, Machine Tools and Manufacture, 37/12, 1715–1719.
- [3] RAMESH R., MANNAN M., POO A., 2000, *Error compensation in machine tools - a review. Part II: thermal errors*, Machine Tools & Manufacture 40, 1257–1284.
- [4] YANG H., NI J., 2003, *Dynamic Modeling for Machine Tool Thermal Error Compensation*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123/2, 245-254.
- [5] FINES J., AGAH A., 2008, *Machine tool positioning error compensation using artificial neural networks*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 21, 1013–1026.
- [6] KONG L., CHEUNG C., TO S., LEE W., DU J., ZHANG Z., 2008, *A kinematics and experimental analysis of form error compensation in ultra-precision machining*, Machine Tools & Manufacture, 48, 1408–1419.
- [7] YUN-FEI Z., BIN L., SIOJIE Y., 2005, *Research on the method of precision evaluation and controlling for the cutter location path in five-axis machining*, Int. J. Adv. Manuf. Technol, 26, 342-350.
- [8] OŻADOWICZ A., 2007, *Dobór i instalacja serwonapędów – porady i wskazówki*. Control Engineering Polska, '02, temat wiodący, <http://www.controlengineering.pl/menu-gorne/artykul/article/dobor-i-instalacja>.
- [9] CHICH-CHING L., CHAO-YIN H., 1998, *A method of tool path compensation for repeated machining process*, Int. Journal of Machine Tools Manufacture, 38/3, 205-213.
- [10] GUIASSA R., MAYER J. R. R., 2011, *Predictive compliance based model for compensation in multi-pass milling by on-machine probing*, CIRP Annals- Manufacturing Technology, 60/1, 391-394.

#### SOFTWARE IMPLEMENTATION OF INCREASING THE ACCURACY OF THE WORKPIECE PRODUCED ON THE CNC MACHINE TOOL

Computer-aided manufacturing and CNC machine tools have opened the possibility of the program influencing on the dimensional accuracy of manufactured products. It became possible to achieve high accuracy required for the implementation of even the machine that does not meet the requirements of the standards for testing machine tool. This article describes the methods and ways for software modifications made during the design process, increasing the accuracy of the workpiece. It also describes the issues related to the inaccuracy of the machine as a function of feed rate and method of correction this inaccuracies.