

Tadeusz KOWALSKI¹
Robert JASTRZĘBSKI²

METODY OCENY DOKŁADNOŚCI TECHNOLOGICZNEJ PRECYZYJNYCH TOKAREK CNC

Wybrano i scharakteryzowano metody badań dostosowane do oceny błędów ruchów technologicznych. Są to: metoda oceny zmian położenia osi obrotowej, metoda pomiaru błędów nastawionych prędkości obrotowych, test interpolacji kołowej. Wybór, dokładność i parametry tych metod dostosowano do wybranych zadań obróbkowych. Zaproponowano ocenę wpływu konstrukcji maszyny na dokładność obrabianych przedmiotów. Postawiono pytanie; czy przyczyną błędów obróbki przedmiotów są błędy obrotu przedmiotu, błędy obrotu narzędzia, czy błędy nastawionego posuwu osi X, Z lub ruchu interpolowanego i czy wynikają one z właściwości konstrukcyjnych tokarki (odwzorowanie), czy z błędów regulacji ruchów technologicznych (głównie nadążania).

1. WSTĘP

Współczesne tokarki NC pozwalają na koncentrację operacji obróbkowych na skutek złożenia kilku ruchów technologicznych, są to:

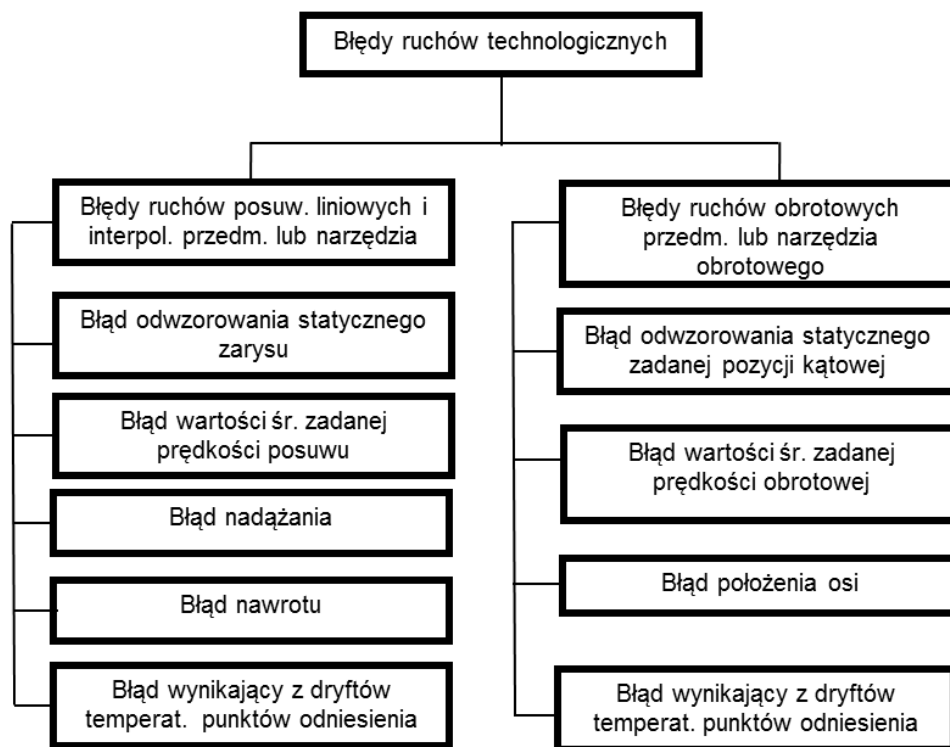
- toczenie powierzchni krzywoliniowych - ruchy interpolowane osi posuwowych,
- frezowanie i wiercenie po obwodzie narzędziami obrotowymi - ruch złożony osi posuwowej i obrotowej,
- obróbka z przechwytem przez wrzeciono przechwytyjące - synchronizacja obrotów wrzecion,
- toczenie wielokątów - synchronizacja stałego przełożenia obrotu wrzeciona i narzędzia obrotowego z jednoczesnym ruchem posuwowym narzędzia,
- toczenie gwintów falistych - synchronizacja obrotów wrzeciona z cyklicznym ruchem nawrotnym osi X i posuwem osi Z.

Polska norma z 1994 r. „Warunki odbioru tokarek kłowych - badanie dokładności” wyróżnia tokarki precyzyjne i pozostałe, na podstawie ujętych w tej normie dopuszczalnych odchyłek dokładności geometrycznej. Poszczególne odchyłki dokładności geometrycznej, dla tokarek precyzyjnych wg tej normy, w większości przypadków mieszczą się w zakresie od 0,01mm do 0,02/300mm. Jednak wysoka dokładność geometryczna tokarek jest tylko jednym z warunków zapewniających dokładną obróbkę. Jest tylko jedną z właściwości

¹ Zakład Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem, Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej

² Centrum Badawczo-Konstrukcyjne spółka z o.o.

obrabiarki wpływającą na jej dokładność technologiczną. Nie mniej ważne są właściwości konstrukcyjne, statyczne, kinematyczne, dynamiczne oraz cieplne obrabiarek. Wszystkie te właściwości wpływają wspólnie, w sposób złożony, na dokładność obróbki.



Rys. 1. Podział błędów ruchów technologicznych, składających się na błąd realizacji oczekiwanej trajektorii ruchu
Fig. 1. Division of technological motion errors, constituting total error of performing expected motion trajectory

Wysoka dokładność i powtarzalność jednego rodzaju obróbki nie musi przekładać się na dokładność i powtarzalność innego rodzaju obróbki na tej samej tokarce. Najczęściej decydującym o dokładności obróbki czynnikiem jest utrzymanie zadanych parametrów ruchów technologicznych (rys. 1). Błędy przedmiotu obrobionego wynikające z ruchów technologicznych złożonych mogą powstawać na skutek błędów obrotu przedmiotu, błędów obrotu narzędzia, czy błędów nastawionego posuwu osi X, Z lub ruchu interpolowanego.

Dokładność technologiczna rozumiana jest jako najlepsza zdolność, predyspozycja obrabiarki o określonych rozwiązaniach konstrukcyjnych do uzyskania dokładnej obróbki, przy określonych warunkach i parametrach pracy. Predyspozycja ta może być różna dla różnych rodzajów obróbki na tej samej tokarce np. można bardzo dokładnie toczyć średnice, natomiast przy obróbce kształtowej toczenia kuli mogą pojawić się znaczne błędy na skutek wpływu złożonych ruchów. Dlatego potrzebna jest ocena dokładności realizowanych złożonych ruchów.

Metody badań, których można użyć do zweryfikowania dokładności nastawianych ruchów technologicznych to:

- metoda oceny zmian położenia osi obrotów,

- metoda pomiaru błędów nastawionych prędkości obrotowych,
- test interpolacji kołowej.

Metody te mogą również posłużyć jako narzędzie do oceny przeprowadzanych regulacji nastawień obrabiarki.

W zależności od rodzaju kształtowania może być konieczne użycie np. dwóch metod badań. W przypadku toczenia kuli konieczna jest interpolacja po okręgu osi posuwowych i ruch obrotowy przedmiotu obrabianego. Powstające błędy w płaszczyźnie ruchów posuwowych XZ (błąd trajektorii i nadażania) i płaszczyźnie toczenia XY (błąd ruchu wirującego wrzeciona i odwzorowania zarysu) wymagają zastosowania testu interpolacji kołowej i metody pomiaru błędów nastawionych obrotów.

2. METODY BADAŃ

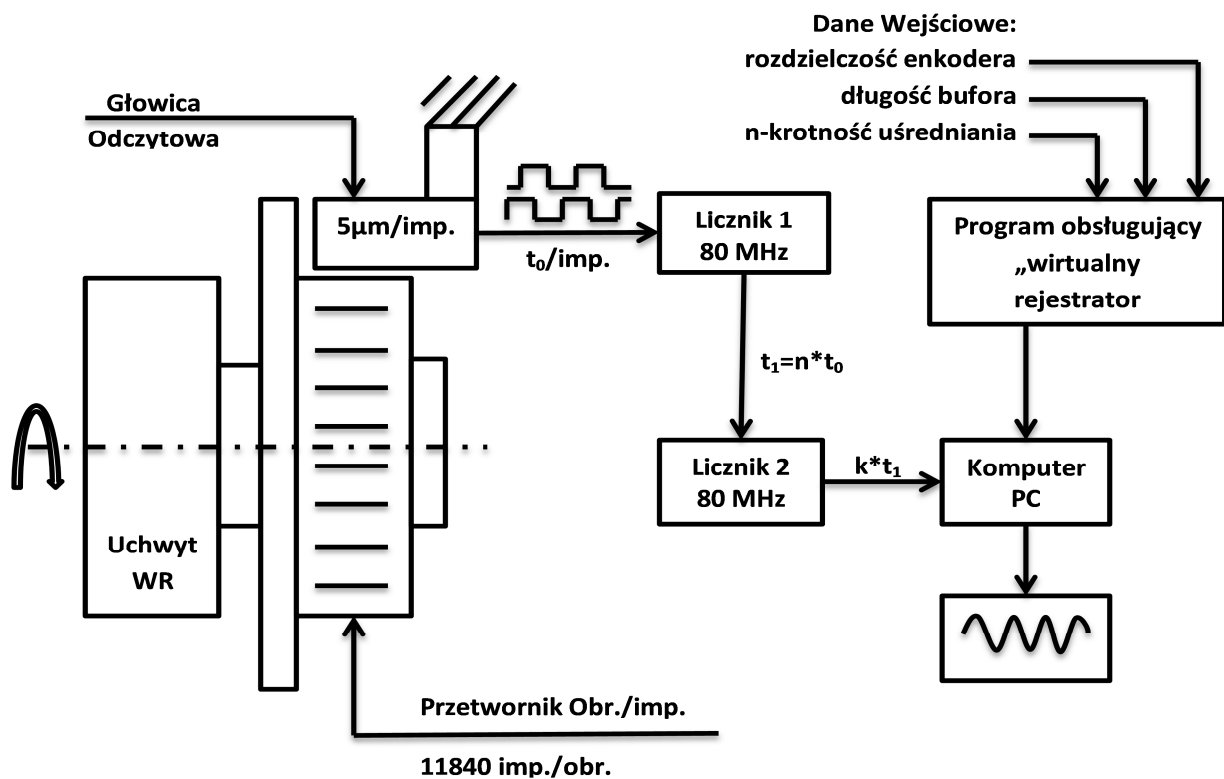
Metoda oceny zmian położenia osi obrotów (rys. 2) polega na pomiarze całkowitego przemieszczenia trzpienia wzorcowego w określonych kierunkach (TIR). Oś jest pojęciem teoretycznym, ale można analizować chwilowe położenia kątowe osi. Przy większych prędkościach obrotowych znaczący wpływ na chwilowe położenie osi mają siły pochodzące od dynamiki ruchu. Najczęściej dokonuje się pomiaru w punkcie określającym położenie końcówki wrzeciona. Stosowany trzpień wzorcowy cechuje się bardzo wysoką okrągłością do 0,002mikrometra. Do pomiaru przemieszczeń trzpienia wzorcowego stosuje się bezstykowe czujniki pojemnościowe (0,03mikrometra/15kHz), o maksymalnej rozdzielczości 0.001mikrometra (50 000obr/min). Przy idealnym położeniu osi obrotu i idealnej okrągłości powierzchni pomiarowej wykresy czasowe przedstawiają sinusoidę, reprezentującą mimośrodowość powierzchni pomiarowej względem osi obrotu. Odchyłki od tej sinusoidy reprezentują chwilowe zmiany położenia osi.



Rys. 2. Pomiar zmian położenia osi wirujących
Fig. 2. Measurement of rotational axes position change

Metoda pomiaru błędów nastawionych prędkości obrotowych została opracowana w CBKO i jest stosowana do oceny tych rodzajów obróbki, które wymagają synchronizacji prędkości ruchów interpolowanych. Mogą one dotyczyć:

- błędów kątowych synchronizacji obrotów przy obróbce z przechwytem,
- błędów obróbki toczenia wielokątów metodą skojarzonego ruchu przedmiotu obrabianego i narzędzia [1],
- błędów obróbki kształtowej ruchu obrotowego osi C wrzeciona i osi posuwowej np. w toczeniu gwintów falistych.

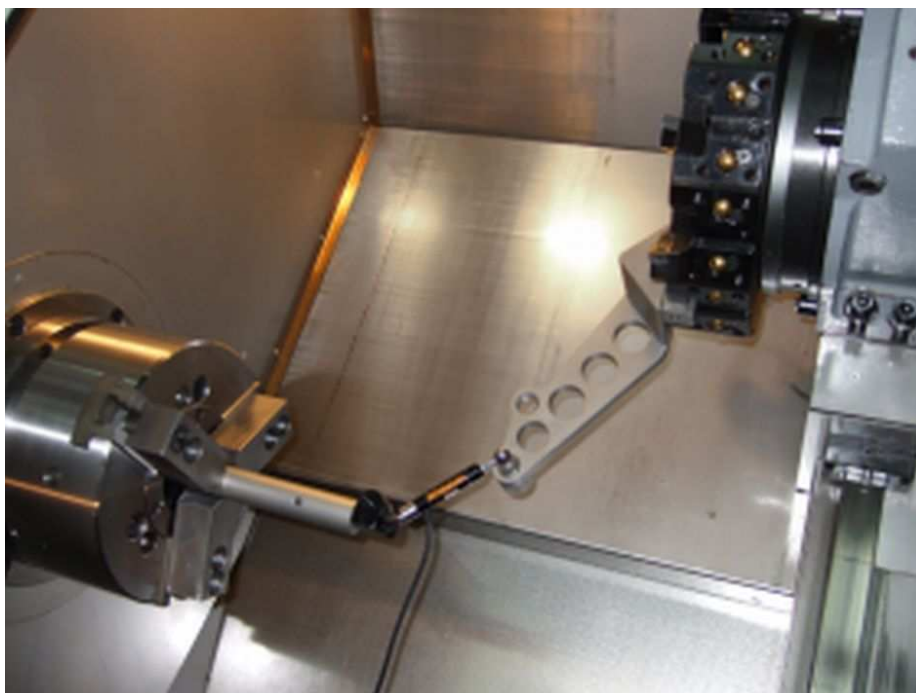


Rys. 3. Schemat pomiaru prędkości chwilowej wrzeciona tokarki

Fig. 3. Diagram of measurement of instantaneous rotational speed of lathe spindle

Metoda ta pozwala wyznaczać prędkość chwilową, równomierność prędkości nastawionej, oraz średnią odchyłkę od prędkości zadanej. Dokładny pomiar prędkości chwilowej (rys. 3) przy prędkościach wrzeciona kilka tysięcy obr/min wymaga bardzo dokładnego pomiaru krótkich odcinków drogi rzędu nanometrów, dokładnego pomiaru krótkich odcinków czasu rzędu nanosekund, dużych szybkości przetwarzania sygnału rzędu MHz. Polega ona na wprowadzeniu standardowego sygnału z enkodera na wejście licznikowe karty pomiarowej taktowanej częstotliwością 80MHz i zliczaniu impulsów pomiędzy kolejnymi sygnałami z enkodera. Test interpolacji kołowej (rys. 4) jest przeprowadzany w płaszczyźnie ruchów posuwowych XZ, a wyznaczany wskaźnik kołowości nie przekłada się na okrągłość toczonego przedmiotu. Metoda ta przydatna jest do oceny:

- błędów trajektorii ruchu interpolowanego osi posuwowych, np. toczenia kształtowego, oraz toczenia gwintów falistych,
- błędów dynamiki ruchu nadążania i nawrotu,
- błędów odwzorowania zarysu, wynikających z nieprostoliniowości, nieprostokątności, oraz różnicy skali i błędów cyklicznych,
- analizy wpływu stosowanych regulatorów układów sterowania i ich nastaw na błędy zadanej trajektorii ruchu interpolowanego.



Rys. 4. Test interpolacji kołowej wykonywany na tokarce
Fig. 4. Circle interpolation test conducted on lathe

3. PRZYKŁADY OCENY KONSTRUKCJI I MONTAŻU TOKAREK

W metodzie oceny zmian położenia osi obrotów wyznaczane są wskaźniki błędnych ruchów technologicznych osi:

- błąd synchroniczny promieniowy wskazuje na owalność toczonej powierzchni. Należy sprawdzić i wyeliminować błędy pracy wrzeciona spowodowane błędem okrągłości bieżni lub obsady łożysk, jak i błędem ustawienia obsady łożysk. Jeżeli pojawią się uskoki promieniowe na wykresach błędów osiowych lub promieniowych, to wystąpi pogorszenie jakości obrobionej powierzchni, a przyczyną może być uszkodzenie bieżni łożysk,
- błąd synchroniczny osiowy wskazuje na niewłaściwe napięcie wstępne łożysk lub błąd ustawienia obsady łożysk. Ten błąd wywołuje pogorszenie jakości obrobionej powierzchni,

- błąd asynchroniczny promieniowy wskazuje chropowatość powierzchni,
- błąd asynchroniczny osiowy wskazuje na niedostateczną sztywność lub niewyważenie, pojawiają się luzy osiowe. Występuje pogorszenie jakości obrabianej powierzchni w pewnych zakresach prędkości,
- błąd całkowity wskazuje na mimośrodowe zamocowanie przedmiotu obrabianego względem położenia średniego osi obrotu. Występuje pogorszenie jakości obrabianej powierzchni oraz błędy obróbki wynikające z błędów ruchów interpolowanych.

Metoda oceny zmian położenia osi obrotów stosowana jest do [2]:

- pomiaru ruchów promieniowych, kątowych i wzdłużnych zamocowanego przedmiotu,
- do oceny błędów mimośradowości mocowania przedmiotu względem osi obrotu wrzeciona,
- do oceny zmian położenia osi obrotu wrzeciona względem narzędzia w funkcji kąta obrotu,
- do oceny dryftów temperaturowych.

Metoda ta przydatna jest do oceny np. błędów frezowania po obwodzie narzędziami w płaszczyźnie toczenia, błędów mimośradowości mocowania względem osi obrotu, wpływających na dokładność odwzorowanego kształtu w kierunku promieniowym, oraz do określenia możliwej do uzyskania chropowatości dla danej prędkości obrotowej, jak i błędów odkształceń cieplnych, itd. [3]. Jednocześnie metoda jest bardzo przydatna do oceny jakości montażu wrzecion, stanu i dokładności łożysk po zmontowaniu, stanu zużycia łożysk, wykrywania luzów promieniowych łożysk[4].

Metodę pomiaru błędów nastawionych prędkości obrotowych stosuje się w ocenie błędów prędkości obrotowych i ich wpływu na uzyskiwane kształty [4]. W metodzie tej wyznacza się wskaźniki dokładności ruchu obrotowego wrzeciona:

- błąd średniej prędkości ruchu obrotowego wrzeciona, pracującego w trybie nastawionych obrotów, wpływa na błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonego ruchu obrotowego. Przyczyną tego błędu jest błąd nadażania wynikający z nieprawidłowych nastaw regulatora prędkości lub błędu przełożenia przekładni na skutek błędów rozstawu osi lub średnicy kół,
- błąd równomierności prędkości ruchu obrotowego wrzeciona, pracującego w trybie nastawionych obrotów, wpływa na błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonego ruchu obrotowego oraz na błąd podziału kąowego obrabianych przedmiotów, gdy obróbka odbywa się z synchronizacją prędkości dwóch osi obrotowych. Przyczyną konstrukcyjną jest błąd bicia promieniowego kół przekładniowych względem osi wrzeciona lub silnika napędowego lub też nieprawidłowe napięcie pasów przekładniowych lub błąd współosiowości przetwornika obrotów i osi wrzeciona,
- błąd nastawionej prędkości ruchu obrotowego wrzeciona, pracującego w trybie pozycjonowania kąowego, wpływa na błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonego ruchu osi posuwowych i obrotowej. Przyczyną konstrukcyjną jest błąd przełożenia przekładni wynikający z błędów rozstawu osi kół oraz z błędu nadażania na skutek niskich wzmocnień regulatora prędkości lub zbyt dużych oporów ruchu,

- błąd równomierności prędkości ruchu obrotowego wrzeciona, pracującego w trybie pozycjonowania kąowego, wpływa na błędy kształtu i falistości obrabianych powierzchni metodami skojarzonego ruchu osi posuwowych i obrotowej. Przyczyną konstrukcyjną jest nieprawidłowe napięcie pasów przekładniowych, błąd bicia promieniowego kół przekładniowych, błąd pozycjonowania przetwornika kąta obrotu lub zmienne opory ruchu spowodowane nieprawidłowym napięciem wstępnym łożyska.

4. WNIOSKI

1. Przy obecnych możliwościach koncentracji operacji na tokarkach NC i dążeniu do zwiększania wydajności, błędy obróbki wynikające z dokładności utrzymania nastawionych ruchów technologicznych stają się coraz większym problemem konstrukcyjnym. Błędy te należy eliminować na etapie projektowania obrabiarek oraz w samym procesie montażu.
2. Przedstawione metody badań wydają się być obecnie najbardziej efektywne przy ocenie omawianych błędów ruchów technologicznych. Pozwalają na ocenę wynikających z nich błędów obróbki oraz sprawdzanie efektów przeprowadzanych regulacji lub stosowania nowych rozwiązań regulacyjnych.
3. Planowane są dalsze prace nad diagnostyką konstrukcji obrabiarek oraz poszukiwaniem kolejnych metod oceny dokładności technologicznej, co pozwoli wzbogacić bazę wiedzy o przyczynach powstawania błędów obróbki.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2012 jako projekt badawczy CBKO.

LITERATURA

- [1] JASTRZĘBSKI R., NIEDBAŁA M., 2011, *Wysokowydajna obróbka wielokątów na uniwersalnej tokarce CNC*, Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, 4, 25-30.
- [2] JASTRZĘBSKI R., KOWALSKI T., OSÓWNIAK P., SZEPEKE A., 2010, *Wyznaczanie dokładności urządzeń technologicznych metodą interpolacji kołowej*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 2, 14-21.
- [3] JEMIELNIAK K., 2004, *Analiza błędnych ruchów wrzecion szybkoobrotowych*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska, 24/2.
- [4] JASTRZĘBSKI R., KOWALSKI T., OSÓWNIAK P., SZEPEKE A., 2011, *Wykrywanie błędów montażu precyzyjnych szybkoobrotowych wrzecion obrabiarek*. Mechanika – Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, 83, 119-129.

METHODS OF TECHNOLOGICAL ACCURACY EVALUATION OF PRECISION CNC LATHES

Selected and described are methods adapted for evaluation of technological motion errors. These are: method of evaluation of rotating axes position change, method of measurement of rotational speed error, circular interpolation test. Selection, accuracy and parameters of these methods have been adapted for selected machining tasks. The question has been raised: if the cause of machining inaccuracies is error of workpiece rotation, error of tool rotation, error of set feed rate of X or Z axes or error interpolation motion and if the errors are result of properties of a lathe (reproduction) or of erroneous technological motions (mainly following error).