ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969

Seria: MECHANIKA z. 41 Nr kol. 261

MIECZYSŁAW PISZ, MACIEJ SZEWCZYK, ADAM BATSCH

POMIAR KINEMATYCZNEJ DOKŁADNOŚCI OBRABIAREK

Streszczenie: Omówiono wpływ różnych czynników na powstanie błędów w kinematycznych łańcuchach wewnętrznych obrabiarek do uzwojeń i uzębień oraz sposoby pomiaru tych błędów. Za pomocą skonstruowanych i wykonanych w Katedrze Obrabiarek Politechniki Śląskiej przyrządów dokonano pomiaru i rejestracji błędów kinematycznych łańcucha kształtowania linii śrubowej na tokarce oraz łańcucha podziału frezarki obwiedniowej.

Następnie dokonano analizy występujących błędów oraz zaproponowano inne niż to przewidują Polskie Normy, kryteria określania dokładności łańcuchów kinematycznych wrzeciono - śruba pociągowa na tokarkach.

1. WSTĘP

Dokładność geometryczna powierzchni przedmiotów wykonanych drogą obróbki skrawaniem zależy od całego szeregu czynników, które można przyporządkować do 3 zasadniczych grup:

a. Zespół czynników określających dokładność geometryczną obrabiarki, narzędzia oraz wzajemnego położenia tych dwóch elementów.

b. Zespół czynników związanych z dokładnością kinematyczną kształtowania powierzchni.

c. Zespół czynników związanych z dynamiką procesu skrawania, w którym decydującą rolę odgrywa sztywność układu obrabiarka - przedmiot - narzędzie.

O ile w obrabiarkach o prostych ruchach kształtowania dokładność obrabianej powierzchni zależy głównie od dokładności geometrycznej oraz sztywności obrabiarki, to w przypadku obrabiarek, w których występują złożone ruchy kształtowania, na dokładność obróbki, oprócz wymienionych czynników grupy a i c, ma wpływ zespół czynników określających dokładność tzw. wewnętrznych łańcuchów kinematycznych. Złożony ruch kształtowania powstaje z reguły w wyniku geometrycznego sumowania się dwóch lub więcej ruchów prostych. Powiązanie kinematyczne dwóch członów wewnętrznych łańcucha kinematycznego narzuca zależność pomiędzy ich przemieszczeniami. Zależność tę w sposób najogólniejszy można zapisać w postaci:

$$\beta = f(\alpha), \tag{1}$$

gdzie:

α i β - przemieszczenie członu początkowego i końcowego łańcucha kinematycznego.

Zależność (1), zwana funkcją kinematyczną, jest słuszna zarówno dla przemieszczeń liniowych jak i kątowych, zaś wybór początkowego i końcowego członu łańcucha kinematycznego jest dowolny lecz w konkretnych przypadkach uzależniony jest zwykle względami praktycznymi. W większości przypadków obrabiarek do kształtowania powierzchni złożonych, w tym dla obrabiarek do gwintów i uzębień, funkcja kinematyczna jest teoretycznie funkcją liniową o postaci

$$\beta_t = \alpha i_o, \tag{2}$$

gdzie:

i_o - teoretyczne przełożenie łańcucha kinematycznego,

α - przemieszczenie członu początkowego,

β_t - teoretyczne przemieszczenie członu końcowego.

W łańcuchu rzeczywistym, w którym występują przekładnie rzeczywiste obarczone pewnymi błędami, przełożenie nie jest wartością stałą, a zatem funkcja kinematyczna nie jest funkcją liniową.

Oznaczając przez $i = i(\alpha)$ rzeczywiste, chwilowe przełożenie łańcucha kinematycznego oraz wychodząc z definicji przełożenia

$$i = \frac{\omega_k}{\omega_p},$$

gdzie:

$\omega_k = \frac{d\beta}{dt}$ - prędkość członu końcowego łańcucha kinematycznego

$\omega_p = \frac{d\alpha}{dt}$ - prędkość członu początkowego łańcucha kinematycznego,

otrzymamy

$$i(\alpha) = \frac{d\beta}{d\alpha},$$

a stąd

$$\beta = \int_0^{\alpha} i(\alpha)d\alpha. \qquad (3)$$

Wykorzystanie tego równania w warunkach praktycznych związane byłoby z dużym nakładem pracy z uwagi na trudności analitycznego ujęcia funkcji zmiennego przełożenia $i(\alpha)$.

Równanie (3) można jednak przekształcić do postaci, która będzie bardziej wygodna do stosowania przy dokonywaniu pomiarów dokładności łańcucha kinematycznego.

Wyrażając zmienne przełożenie $i(\alpha)$ jako funkcję liniową przełożenia teoretycznego i_o oraz błędu tego przełożenia Δi

$$i(\alpha) = i_o + \Delta i$$

i wstawiając do równania (3) otrzymamy

$$\beta = \int_0^{\alpha} (i_o + \Delta i) d\alpha.$$

Ponieważ i_o = const, zaś na podstawie twierdzenia de L'Hospitala $\int_0^{\alpha} \Delta i \, d\alpha = \Delta I\alpha$, zależność powyższa przyjmie postać:

$$\beta = i_o\alpha + \Delta I\alpha \quad . \tag{3a}$$

W równaniu (3a) ΔI oznacza średni błąd przełożenia na drodze, jaką przebył element początkowy. Po uwzględnieniu zależności (2) można napisać jeszcze inaczej:

$$\beta = \beta t + \Delta I\alpha,$$

skąd

$$\Delta I\alpha = \beta - \beta_t.$$

Wartość wyrażenia $\Delta I\alpha$, jako różnica przemieszczenia rzeczywistego i teoretycznego członu końcowego, jest błędem przemieszczenia tegoż członu lub po prostu błędem kinematycznym

$$\Delta I\alpha = \Delta\beta. \tag{4}$$

Powracając do pierwotnej postaci równania (3a) ostatecznie można napisać, że

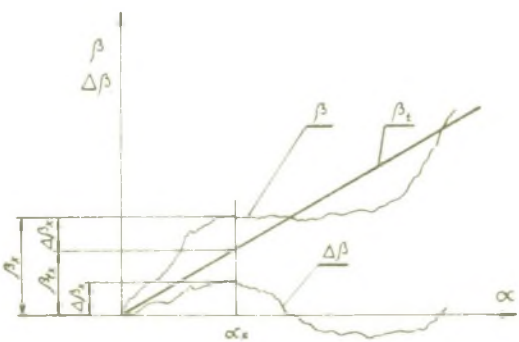
$$\beta = \alpha i_o + \Delta\beta \tag{5}$$

lub

$$\beta = \beta_t + \Delta\beta . \tag{5a}$$

Z równania (5) wynika, że dla określenia przemieszczeń członu końcowego łańcucha kinematycznego, konieczna jest znajomość przełożenia teoretycznego oraz błędu kinematycznego tego łańcucha.

Wartość błędu kinematycznego $\Delta\beta$ można wyznaczyć na drodze pomiarów, a następnie z równania (4) określić błąd przełożenia ΔI. Przykładowe wykresy funkcji opisanych równaniami (2), (3) i (4) przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Przykładowy wykres rzeczywistej i teoretycznej funkcji kinematycznej $\beta(\alpha)$ i $\beta_t(\alpha)$ oraz błędu kinematycznego $\Delta\beta(\alpha)$

2. SPOSOBY POMIARU BŁĘDÓW KINEMATYCZNYCH

Błędy kinematyczne łańcuchów wiążących ruchy dwóch członów obrabiarki mogą być zmierzone w zasadzie dwoma sposobami. Pierwszy sposób oparty jest o wyprowadzoną zależność (5) i polega na mierzeniu kolejnych chwilowych przemieszczeń rzeczywistych członu końcowego (β) w funkcji członu początkowego (α). Przy znanym przełożeniu teoretycznym (i_o) błąd kinematyczny równa się

$$\Delta\beta = \beta - \alpha i_o.$$

Jako przykład ilustrujący opisany sposób pomiaru, posłużyć może praktykowane do niedawna sprawdzanie dokładności łańcucha kinematycznego kształtowania linii śrubowej na tokarce. Wykonując określone ilości obrotów wrzeciona tokarki (α) mierzyło się kolejno przebyte drogi suportu (β) przy ustalonym z góry przełożeniu (i_o) łańcucha kinematycznego, wiążącego wrzeciono z suportem. Wartości błędu chwilowego oraz maksymalnego błędu w danym przedziale pomiarowym ustalić można było na drodze obliczeń, przy czym samych pomiarów dokonywać można było w sposób ciągły z rejestracją wartości skrajnych członów lub nieciągły (dyskretny). Opisany sposób pomiaru obarczony jest szeregiem wad, z których najważniejsza to trudność mierzenia dużych przemieszczeń kątowych i liniowych z wysoką dokładnością, pozwalającą na wykrycie wspomnianego błędu.

Drugim sposobem pomiaru błędu kinematycznego, opartym o równanie (5a), jest pomiar przy użyciu wzorca. W metodzie tej teoretyczne położenie członu końcowego (β_t) reprezentuje element pomiarowy wzorca, zaś rzeczywiste (β) - sam człon końcowy łań-

cucha kinematycznego. Różnica tych wartości daje wprost wartość błędu kinematycznego

$$\Delta\beta = \beta - \beta_t.$$

Znając wartość chwilowego błędu kinematycznego można z przytoczonego równania (4) określić wartość średniego błędu przełożenia ΔI, jak również wartość średnią samego przełożenia po zastosowaniu do równania (3) twierdzenia de L'Hospitala

$$\beta = \int_0^{\alpha} i(\alpha)d\alpha,$$

$$\int_0^{\alpha} i(\alpha)d\alpha = I\alpha,$$

$$\beta = I\alpha, \quad I = \frac{\beta}{\alpha},$$

gdzie:

$I = I(\alpha)$ - średnie przełożenie na drodze jaką przebył element początkowy.

Zasadniczą zaletą sposobu pomiaru przy użyciu wzorca jest to, że mierzy się wprost wartość błędu kinematycznego, a zatem pomiar może być przeprowadzony z dużą dokładnością przy użyciu takich narzędzi mierniczych, jak np. czujniki mikronowe. Pomiar przy użyciu wzorca nie pozbawiony jest jednak wad, do których należą błędy samego wzorca oraz konieczność użycia innego wzorca dla każdej teoretycznej wartości sprawdzanego przełożenia. Podobnie jak w poprzedniej metodzie, pomiar przy użyciu wzorca może być przeprowadzony w sposób ciągły lub dyskretny.

Oprócz wyżej opisanych sposobów pomiaru dokładności kinematycznej istnieje cały szereg innych, opartych o równanie definicyjne przełożenia $i = \frac{\omega k}{\omega_p}$, polegających na równoczesnym mierzeniu prędkości członów skrajnych łańcucha kinematycznego. Błąd kinematyczny może być wówczas wyliczany z zależności

$$\Delta\beta = \int_0^{\alpha} \Delta i \, d\alpha.$$

Uzyskanie wykresu tego błędu związane jest jednak ze znacznym nakładem pracy.

3. METODY POMIARU BŁĘDÓW KINEMATYCZNYCH

W rozdziale niniejszym opisano dwie metody pomiaru błędów kinematycznych za pomocą urządzeń skonstruowanych i wykonanych w Katedrze Obrabiarek Politechniki Śląskiej.

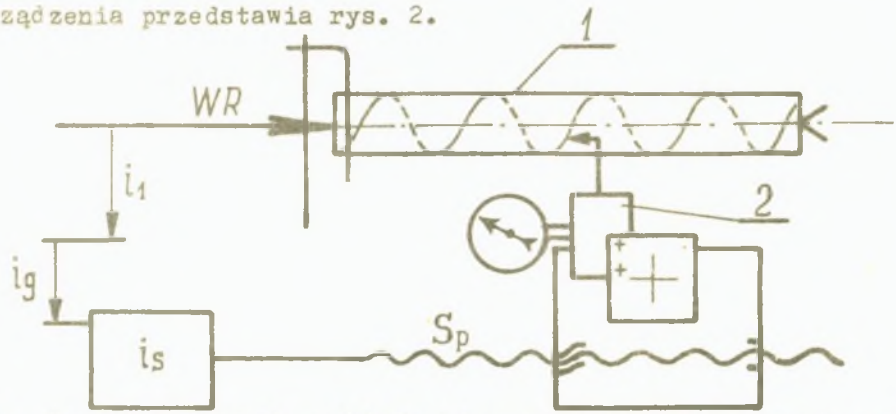
Metoda pierwsza dotycząca pomiaru obrabiarek do gwintów, jest metodą ciągłą z rejestracją błędu kinematycznego, druga zaś dotyczy pomiaru błędu kinematycznego frezarki obwiedniowej w sposób dyskretny. Pomiar dokładności kinematycznej obrabiarki do gwintów oparty jest o zasadę pomiaru przy użyciu wzorca, zaś pomiar dokładności frezarki obwiedniowej należy zaliczyć do metody pomiaru kolejnych położeń członu początkowego i końcowego badanego łańcucha kinematycznego.

Z góry trzeba zaznaczyć, że o ile metoda pierwsza jest wystarczająco dokładną i nadającą się do zastosowania w szerokim pojęciu, o tyle wyniki uzyskane przy pomiarach dokładności frezarki obwiedniowej mogą być traktowane jedynie jako orientacyjne. Składa się na to niedokładność metody pomiaru opartej o pomiar dyskretny.

3.1. Pomiar błędów kinematycznych łańcucha kształtowania linii śrubowej na tokarce pociągowej

3.1.1. Opis urządzenia pomiarowego

Urządzenie składa się z dwóch śrub wzorcowych, z których jedna ma gwint metryczny trapezowy Tr 60 x 8, zaś druga gwint calowy o wymiarze Tr 60 x 2 zw/1". Gwinty śrub wzorcowych są utwardzone i szlifowane, wykazując błąd skoku na całej długości pomiarowej 300 mm nie przekraczający 0,003 mm. Ponadto w skład urządzenia wchodzi czujnik wskazująco-rejestrujący oraz wzmacniacz i rejestrator. Zasadę pomiaru za pomocą urządzenia przedstawia rys. 2.

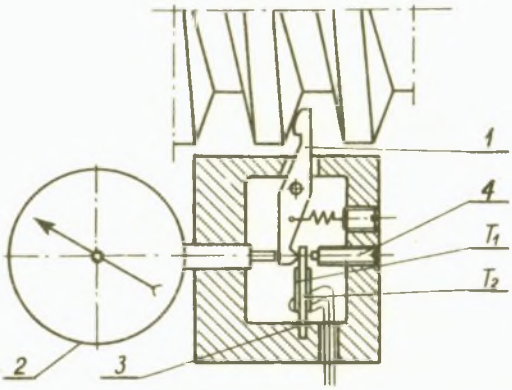


Rys. 2. Schemat pomiaru błędu kinematycznego tokarki przy użyciu wzorca

Wzorzec 1 zamocowany jest w kłach tokarki i obracany zabierakiem. Na suporcie w imaku nożowym przytwierdzony jest czujnik 2, którego końcówka pomiarowa dotyka flanki gwintu wzorca. Przekładnia gitarowa i skrzynka posuwów zapewniają odpowiedni posuw suportu równy skokowi gwintu śruby wzorcowej. Po wprowadzeniu wrzeciona w ruch obrotowy, zwoje gwintu wzorca przesuwają się o wartość teoretyczną, zaś suport przesuwany jest o wartość rzeczywistą, obarczoną błędem. Przemieszczenia względ-

ne suportu i zwojów gwintu śruby wzorcowej, stanowiące błąd kinematyczny ($\Delta\beta$), są wychwytywane przez czujnik. Błąd ten świadczy wprost o dokładności łańcucha kinematycznego, jak również może być podstawą do określenia średniego błędu przełożenia ΔI.

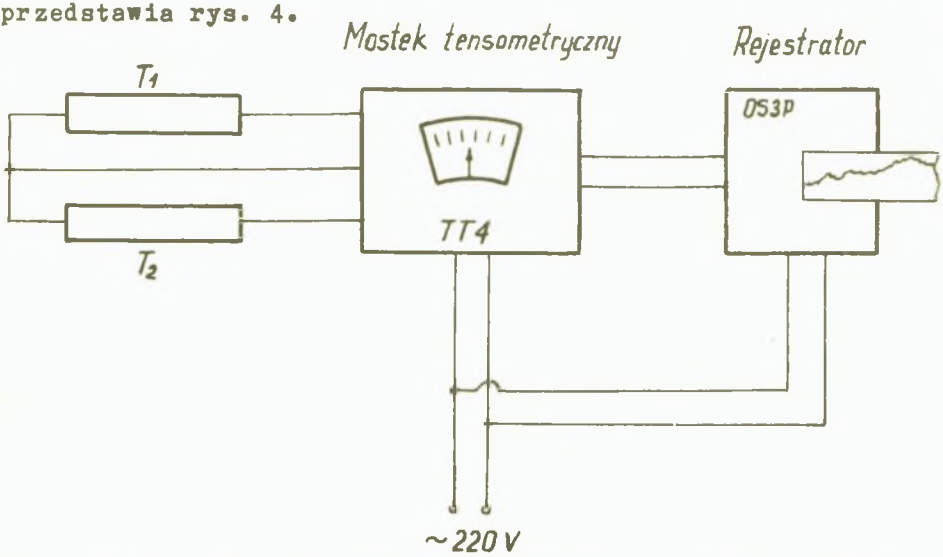
W celu zarejestrowania błędu kinematycznego czujnik 2 ma wbudowane urządzenie tensometryczne współpracujące z typową aparaturą do pomiarów tensometrycznych oraz z rejestratorem szybkopiszącym. Schemat czujnika pomiarowego przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Tensometryczny czujnik pomiarowy

Dźwignia pomiarowa 1 jednym końcem oparta jest o flankę gwintu wzorca, a drugim końcem oddziaływuje na czujnik zegarowy oraz czujnik tensometryczny 3. Czujnik zegarowy służy do bezpośredniego odczytu wartości błędu oraz do wzorcowania czujnika tensometrycznego. Ten ostatni wykonany jest w postaci stalowej płytki, jednym końcem sztywno utwierdzonej w korpusie, z naklejonymi dwoma tensometrami oporowymi T_1 i T_2 tworzącymi pół mostka. W celu zabezpieczenia tensometrów przed zniszczeniem, w korpusie czujnika umieszczony jest wkręt zde-

rzakowy 4. Czujnik tensometryczny współpracując z mostkiem tensometrycznym i rejestratorem pozwala na zapisanie błędów. Schemat połączeń czujnika z aparaturą pomiarowo-rejestrującą przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Schemat połączeń czujnika z aparaturą rejestrującą

3.1.2. Pomiar i rejestracja błędów

W celu zilustrowania opisanej metody pomiaru błędów kinematycznych przy użyciu wzorca dokonano pomiarów błędów na dwóch tokarkach: TR 45 produkcji FUM Poręba oraz podobnej wielkości tokarce f-my "Oerlikon". Te dwie tokarki dobrano celowo z uwagi na jednakowy okres eksploatacji (kilkanaście lat) oraz odmienne systemy miar śrub pociągowych. Tokarka TR 45 wyposażona jest w śrubę pociągową o skoku s = 4 zw/1", zaś tokarka "Oerlikon" w śrubę pociągową o skoku s = 6 mm. Rejestracji i zapisu błędów kinematycznych dokonano przy użyciu wspomnianego urządzenia oraz mostka tensometrycznego typu TT4 i oscylografu 3-pętlicowego OS3P. Jako człon początkowy przyjęto obroty wrzeciona tokarki, zaś jako końcowy - przemieszczenie suportu. Dla

każdej tokarki przeprowadzono po dwa pomiary, dla gwintu metrycznego i calowego, z przesuwem suportu w bezpośrednim sąsiedztwie uchwytu wrzeciona, co odpowiada tej części śruby pociągowej, która jest najczęściej używana do gwintowania (gwinty krótkie). Spodziewano się przez to uzyskać maksymalne wartości błędu kinematycznego ze względu na intensywne zużywanie się śruby pociągowej w tej części. Zarejestrowane przebiegi błędów kinematycznych przedstawiono na załączonych wykresach (rys. 5÷8).

Nadmienić należy, że w celu zmierzenia i zarejestrowania błędów kinematycznych na odcinku większym niż długość wzorca, pomiary przeprowadzać można z przestawianiem czujnika względem suportu, a uzyskane tą drogą wykresy częściowe można składać wzdłuż osi odciętych dla dowolnie długich przebiegów.

3.1.3. Rodzaje błędów kinematycznych i źródła ich powstawania

Na powstanie błędu kinematycznego składają się w zasadzie 4 czynniki:

- błędy wykonania elementów łańcucha kinematycznego
- błąd doboru przekładni gitarowej
- błąd od niesztywności elementów łańcucha
- błąd powstały od nierównomiernego zużycia elementów łańcucha kinematycznego.

Błąd kinematyczny jest więc błędem sumarycznym. Przebieg funkcji tego błędu, zarejestrowany na przykładowych wykresach dowodzi, że jest on wynikiem nakładania się szeregu przebiegów o różnych częstotliwościach i amplitudach.

W zależności od charakteru krzywej błędów składowych, występujących na wykresach, rozróżnić można 3 podstawowe rodzaje błędów:

a) Błąd systematyczny $-\Delta\beta'$. W łańcuchu kształtowania linii śrubowej na tokarce pochodzi od przybliżonego doboru przełożenia przekładni do zmiany jednostek miar. Występuje przeto podczas nacinania gwintów o odmiennym systemie miar w stosunku do miary śruby pociągowej, bez zastosowania w łańcuchu kinematycznym wrzeciono - śruba pociągowa koła o liczbie zębów 127.

Błąd ten można określić znając wartość przybliżonego przełożenia gitary lub też na podstawie zarejestrowanych wykresów, pod warunkiem, że pomiarów dokona się na niezużytej części śruby pociągowej oraz że sama śruba pociągowa nie jest obarczona błędem systematycznym (co praktycznie nie ma miejsca).

b) Błąd nierównomiernego zużycia $\Delta\beta''$ - nazywany dalej błędem zużycia. Źródłem powstawania tego błędu jest w głównej mierze nierównomierne zużycie pary kinematycznej śruba pociągowa - nakrętka. Poza tym, na wielkość tego błędu mają wpływ tzw. błędy pierwotne śruby pociągowej, które można traktować jako błędy zużycia z uwagi na podobny charakter i wpływ na błąd sumaryczny.

Na przedstawionych wykresach błąd zużycia jest wartością różnicy błędu sumarycznego i systematycznego.

c) Błąd cykliczny $\Delta\beta'''$ - widoczny jest na wykresach w postaci powtarzalnych przebiegów o okresie T, stosunkowo wysokiej częstotliwości i małej amplitudzie. Źródłem tych błędów jest sumowanie się błędów podziałek, bicia uzębień i innych przypadkowych błędów kół zębatych całego łańcucha kinematycznego. Na powstanie błędu cyklicznego ma wpływ ponadto bicie osiowe śruby pociągowej oraz niesztywność łańcucha kinematycznego objawiająca się w postaci drgań skrętnych wałków przenoszących napęd.

Znajomość okresu błędu cyklicznego T pozwala na wykrycie głównej przyczyny jego powstawania, którą może być np. koło zębate o takim samym okresie obrotu T, będące elementem łańcucha kinematycznego wrzeciono - śruba pociągowa.

3.1.4. Wyniki pomiarów

Porównując zarejestrowane przebiegi błędu kinematycznego, sporządzone dla dwóch przebadanych tokarek można stwierdzić, że:

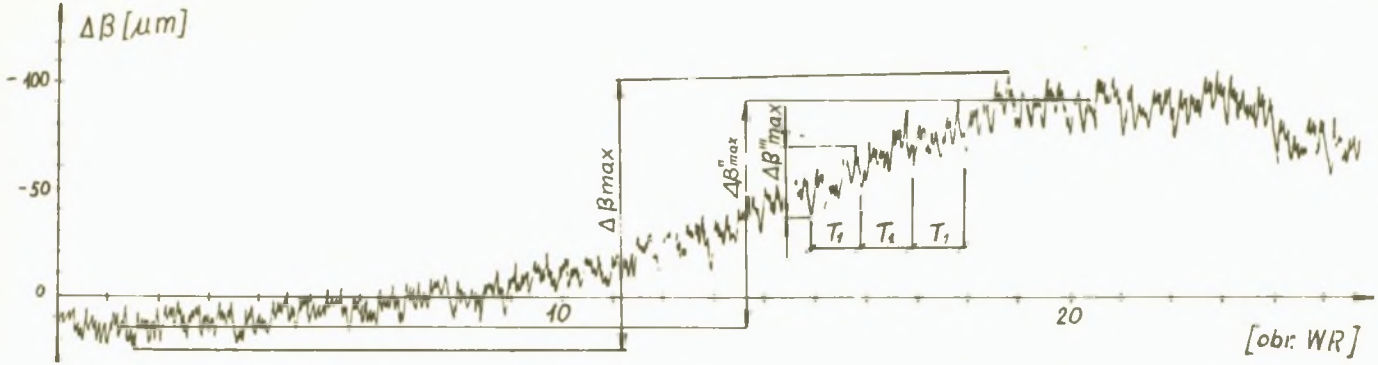
- przy nacinaniu gwintu calowego na tokarce TR45 i gwintu metrycznego na tokarce "Oerlikon" nie występuje błąd systematyczny, co jest potwierdzeniem rozważań z uwagi na zgodność jednostek miar śrub pociągowych i wzorców (patrz rys. 5 i 6);
- obydwie tokarki obarczone są błędem systematycznym w przypadku nacinania gwintów o odmiennym systemie miar w stosunku do jednostek miary skoku śruby pociągowej (rys. 7 i 8). Tokarka TR45 wykazuje systematyczny błąd skoku z niedomiarem - 0,001 mm/skok, zaś tokarka "Oerlikon" - błąd skoku z nadmiarem + 0,0025 mm/skok, co daje odpowiednie błędy względne

$$\delta_1 = \frac{-0,001}{8} = -0,12‰,$$

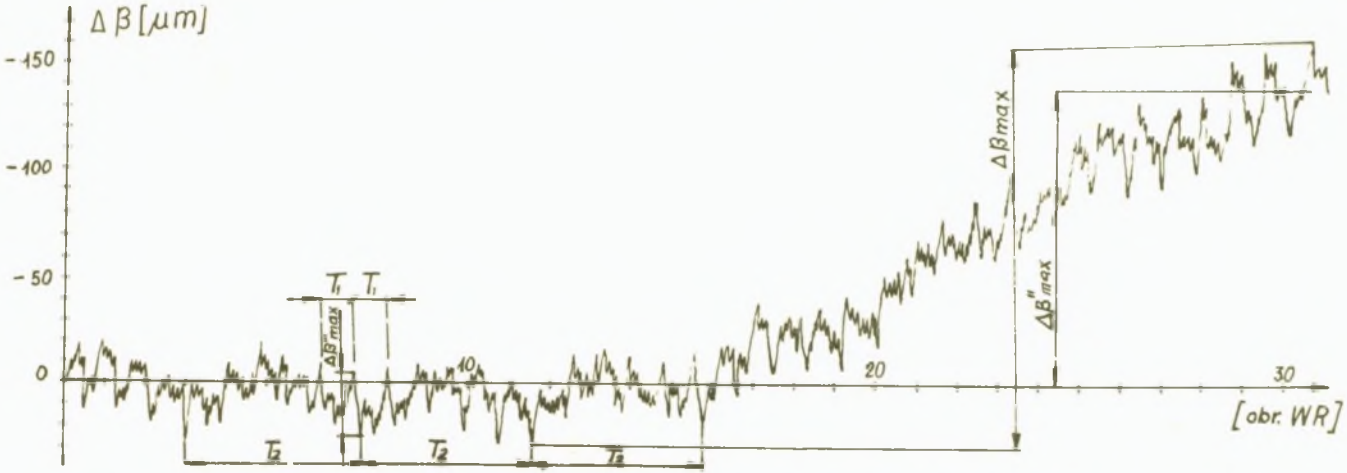
$$\delta_2 = +\frac{0,0025}{12,7} = +0,2‰.$$

Obliczeń dokonano na podstawie odpowiednich wykresów;

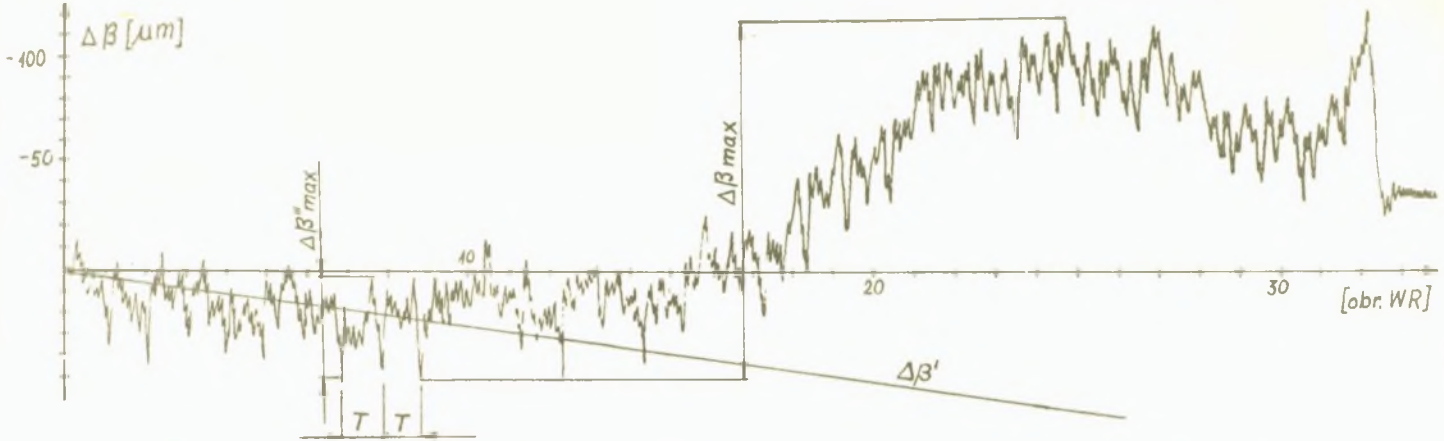
- maksymalne błędy zużycia można łatwo określić z wykresów błędu kinematycznego pozbawionych błędu systematycznego (rys. 5 i 6). Ich wartość w rozpatrywanym przedziale pomiarowym, wyniosła dla tokarki TR45 0,1 mm, zaś dla tokarki "Oerlikon" 0,12 mm. Błąd zużycia osiąga maksimum w okolicach



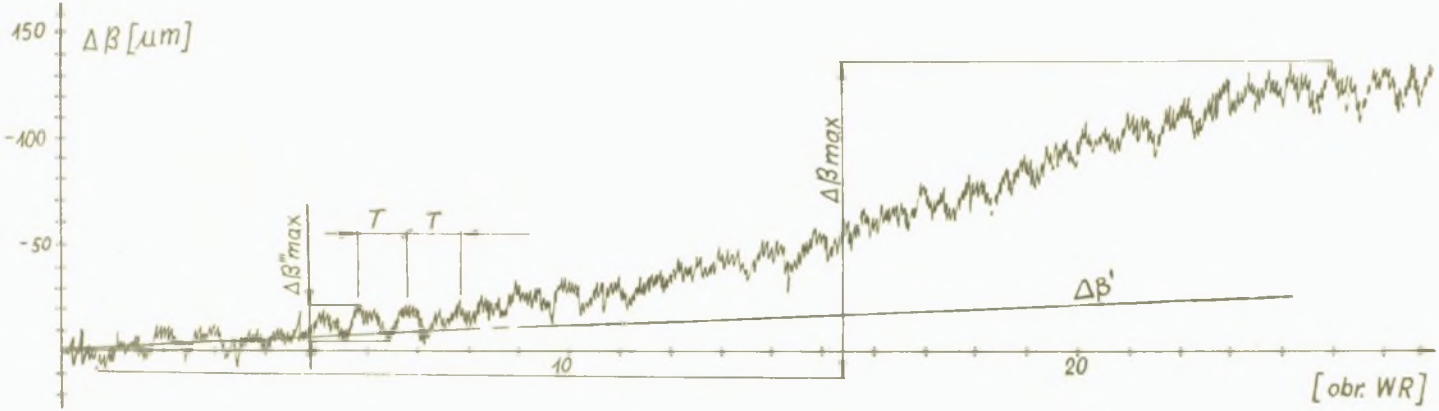
Rys. 5. Wykres błędu kinematycznego tokarki TR45 przy nacinaniu gwintu calowego s = 2 zw/1



Rys. 6. Wykres błędu kinematycznego tokarki "Oerlikon" przy nacinaniu gwintu metrycznego s = 8 mm



Rys. 7. Wykres błędu kinematycznego tokarki "Oerlikon" przy nacinaniu gwintu calowego s = 2 zw/1



Rys. 8. Wykres błędu kinematycznego tokarki TR45 przy nacinaniu gwintu metrycznego s = 8 mm

wrzeciona, to jest w tej części śruby pociągowej, która używana jest najczęściej do gwintowania,

- maksymalne błędy sumaryczne w danym przedziale pomiarowym można odczytać z wykresów (rys. 7 i 8), sporządzonych w miejscach największego zużycia śruby pociągowej. Wynoszą one odpowiednio: 0,150 mm dla tokarki TR45 oraz 0,170 dla tokarki "Oerlikon",
- amplituda okresowo powtarzalnych błędów cyklicznych, zarejestrowana dla tokarki "Oerlikon", jest większa (0,04 mm) niż dla tokarki TR45 (0,02 mm). Powtarzalność przebiegu tego błędu występuje bardzo wyraźnie na wszystkich wykresach i jest różna przy nacinaniu gwintów metrycznych i calowych. Przy nacinaniu gwintu calowego przebieg błędu powtarza się za każdym obrotem wrzeciona (T_1 = 1 obrót WR dla obydwu tokarek), zaś przy nacinaniu gwintów metrycznych odczytano T_1 = 0,8 obr. WR dla tokarki TR45 oraz T_1 = 7/8 obr. WR dla tokarki "Oerlikon".

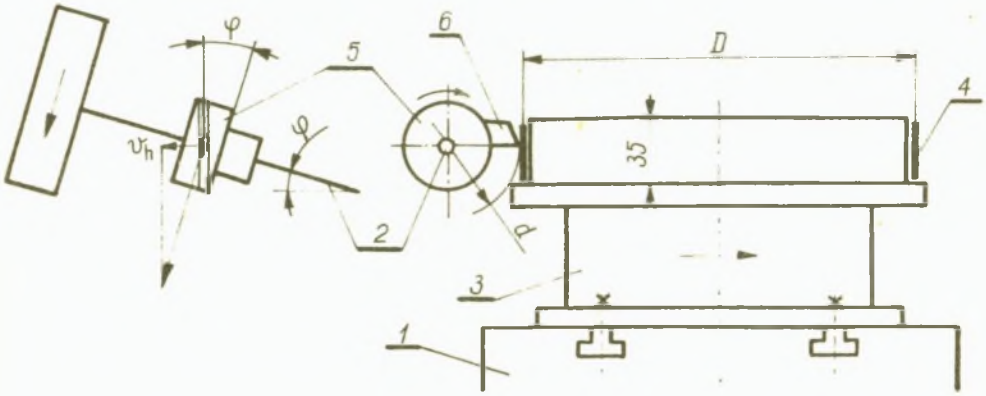
Są to błędy cykliczne o najwyższej częstotliwości. Odczytać można ponadto błąd cykliczny o mniejszej częstotliwości T_2 widoczny na rysunku 6.

- na funkcję błędu cyklicznego nałożone są jeszcze szybkozmienne przebiegi o amplitudach rzędu 0,005 mm i częstościach kilkudziesięciu Hz, pochodzące od drgań silnika elektrycznego. Zapisu tych drgań można uniknąć przez zastosowanie filtru elektrycznego w układzie wzmacniacza, jednakże ze względu na skażenie funkcji błędów, jakie może ten sposób wprowadzić, nie uczyniono tego.

3.2. Pomiar błędów kinematycznych łańcucha podziału frezarki obwiedniowej

3.2.1. Opis urządzenia pomiarowego

Do pomiarów błędów kinematycznych łańcucha podziału frezarki obwiedniowej wykonano w Katedrze Obrabiarek przyrząd oparty o sposób dyskretny pomiaru błędów. Zasadę pracy urządzenia przedstawia rys. 9.



Rys. 9. Schemat pomiaru błędów kinematycznych frezarki obwiedniowej

Na stole frezarki obwiedniowej 1 zamocowany jest bęben 3. Na jego powierzchni cylindrycznej rozpięto taśmę celuloidową 4, zamocowaną za pomocą specjalnych uchwytów. We wrzecionie frezarki 2 znajduje się głowiczka 5 z wystającym nożykiem, który w czasie obrotu wrzeciona i stołu zarysowuje na powierzchni taśmy krótkie i cienkie pionowe kreski.

Układ kinematyczny pomiaru odpowiada układowi frezarki podczas nacinania koła zębatego o zębach prostych. Nacięte ryski, na skutek błędów łańcucha kinematycznego podziału, a w szcze-

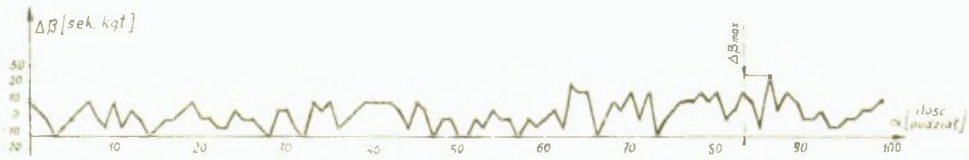
gólności błędów podziałki pary kinematycznej ślimak - ślimacznica do napędu stołu, rozłożą się nierównomiernie na długości taśmy. Odległości pomiędzy poszczególnymi kreskami reprezentować będą podziałkę rzeczywistą, zaś wartość wzorcową reprezentuje tutaj wartość podziałki teoretycznej, uzyskana drogą obliczeń. Porównanie tych dwóch wartości daje błąd kinematyczny podziałki.

Po zdjęciu taśmy z bębna następuje pomiar długości podziałek na mikroskopie warsztatowym. Średnicę bębna D, z uwzględnieniem grubości taśmy filmowej, określono z założenia, że 0,001 mm na obwodzie bębna odpowiada 1 sekundzie kątowej kąta środkowego:

$$\frac{D}{2}\,\frac{1''}{360}\,\frac{\pi}{180} = 0{,}001 \text{ mm}, \quad \text{stąd} \quad D = 412{,}65 \text{ mm}.$$

3.2.2. Wyniki pomiarów

Pomiaru błędów łańcucha kinematycznego podziału dokonano na frezarce obwiedniowej ZFA75 produkcji FUM Poręba. Gitarę podziału dobrano tak, że zapewniała podział obwodu na 100 części, w związku z czym teoretyczna podziałka obwodowa wyniosła t_t = = 12,952 mm. Wartości rzeczywiste podziałek mierzono na mikroskopie warsztatowym i naniesiono na wykres (rys. 10). W świe-



Rys. 10. Wykres błędów podziałki frezarki obwiedniowej ZFA75

tle opisanych poprzednio rodzajów błędów kinematycznych można stwierdzić, że:

- w łańcuchu kinematycznym podziału nie występuje błąd systematyczny $\Delta\beta' = 0$ co oznacza, że gitara podziału została dobrana bez przybliżenia
- maksymalny błąd sumaryczny podziałki odczytany z wykresu wynosi $\Delta\beta_{max} = 0{,}035$ mm czyli 35 sekund kątowych
- z uwagi na dyskretny sposób pomiaru nie ma możliwości określenia wartości błędu cyklicznego
- błąd nierównomiernego zużycia $\Delta\beta''$ jest w tym wypadku trudny do określenia. Można natomiast przypuszczać, że pomierzone grube błędy są w głównej mierze wynikiem nakładania się tzw. błędów pierwotnych ostatniej pary kinematycznej napędzającej stół frezarki, to jest pary ślimak - ślimacznica.

4. OCENA BŁĘDÓW

4.1. Zasadniczym czynnikiem zewnętrznym, mającym wpływ na dokładność pomiaru błędów kinematycznych tokarek, jest promieniowe bicie wzorca oraz niewspółosiowość osi kłów wrzeciona i konika. Pierwszy z nich starano się jak najbardziej pomniejszyć przez przetoczenie miękkiego kła we wrzecionie oraz założenie stałego kła w koniku. Uzyskano przez to promieniowe bicie $\Delta r < 0{,}0025$ mm.

Błąd niewspółosiowości został niemal całkowicie wyeliminowany przez przesunięcie osi konika we właściwe położenie (stożkowatość $< 0{,}002$ mm na dług. 300 mm).

Wpływ bicia promieniowego na dokładność pomiaru skoku ulega dalszym pomniejszeniom ze względu na pochylenie flanki gwintu trapezowego o kąt $\gamma = 15^{\circ}$. Odpowiedni błąd pomiaru w kierunku osiowym wyniesie

$$\Delta l = \Delta r \cdot \operatorname{tg}\gamma = 0{,}0025 \ \operatorname{tg} 15^{\circ} = 0{,}0007 \text{ mm.}$$

W takim samym stopniu zmaleje wpływ błędu niewspółosiowości osi wrzeciona i konika. Uwzględniając błędy wykonania skoku wzorca (0,003 mm na dług. 300 mm) sumaryczne błędy liniowe nie przekroczą wartości 0,004 mm.
Wobec zmierzonych amplitud maksymalnych błędów $\Delta\beta_{max}$ = 0,170 mm daje to dokładność pomiaru

$$\delta_p = \frac{0,004}{0,17} \cdot 100 = 2,5\%.$$

4.2. Dokładność metody pomiaru łańcucha kinematycznego podziału frezarki obwiedniowej nie jest wysoka. Składają się na to następujące przyczyny:
- nierównomierność napięcia taśmy celuloidowej na obwodzie bębna,
- odkształcenia taśmy po zdjęciu z bębna,
- bicie promieniowe bębna (0,01 mm),
- ograniczona dokładność odczytu odległości rysek na mikroskopie (0,005 mm).

Uwzględniając wszystkie czynniki przy starannym przeprowadzeniu pomiaru, można uzyskać dokładność pomiaru rzędu 0,01 ÷ 0,02 mm (10" - 20"), czyli taką, jaka charakteryzuje bardzo dokładne frezarki obwiedniowe bez urządzeń korekcyjnych. Przeciętne frezarki obwiedniowe posiadają maksymalny błąd sumaryczny rzędu 60" - 100" tzn., sześciokrotnie większy niż osiągana dokładność pomiaru wg opisanej metody. Z tych względów wyniki uzyskane drogą pomiarów mogą być uznane za poprawne lecz traktowane jedynie jako orientacyjne.

5. WNIOSKI

5.1. Opisana metoda pomiaru łańcucha kształtowania linii śrubowej tokarki za pomocą wzorca pozwala na zmierzenie i za-

rejestrowanie głównych składowych błędu kinematycznego z wystarczającą dla praktyki dokładnością.

5.2. Dla uzyskania pełnego obrazu błędów badanego łańcucha kinematycznego konieczne jest rejestrowanie tych błędów. Umożliwia to określenie wielkości błędów składowych, a także ustalenie źródła ich powstawania. Nadmienić należy, że nowo opracowana norma odbioru geometrycznego tokarek PN-M/55652 zaleca pomiar dyskretny i to jedynie w trzech punktach wzorca pomiarowego. Nie sprecyzowano też we wspomnianej normie rodzaju mierzonego gwintu oraz jego skoku.
Prowadzić to może do dowolnej interpretacji sposobów pomiaru oraz do pominięcia faktycznie występujących błędów.

5.3. Do pomiaru błędów kinematycznych w praktyce wystarcza użycie dwóch wzorców, reprezentujących gwint metryczny i calowy. Skoki wzorców powinny być możliwie duże, najlepiej zbliżone do skoku śruby pociągowej tokarki. W takim bowiem przypadku, amplitudy błędów cyklicznych łańcucha kinematycznego wrzeciono śruba pociągowa nie ulegają pomniejszeniu wskutek redukującego przełożenia.

5.4. Dla ustalenia maksymalnych błędów sumarycznych, pomiarów należy dokonywać w sąsiedztwie końcówki wrzeciona, a więc w części śruby pociągowej obarczonej największymi błędami zużycia (dotyczy tokarek używanych).

5.5. Wartość błędu systematycznego najlepiej określić na podstawie pomiarów dokonanych z dala od wrzeciona, w tylnej części łoża tokarki, gdzie nie występuje intensywne zużycie pary śruba pociągowa - nakrętka (dotyczy obrabiarek używanych).

5.6. Z uwagi na to, że zarejestrowane na wykresach amplitudy błędów cyklicznych osiągają wartości stosunkowo duże, nie pozostające bez wpływu na błędy sumaryczne, autorzy sugerują

wprowadzenie do odpowiedniej normy odbioru geometrycznego tokarek oddzielnego pola tolerancji dla tych błędów.

5.7. W świetle przeprowadzonych pomiarów nasuwa się nowa koncepcja ujęcia dopuszczalnych odchyłek skoku gwintu. Należałoby mianowicie wprowadzić oddzielnie odchyłki dopuszczalne dla błędu systematycznego, błędu cyklicznego oraz błędu zużycia, przy czym wielkość tego ostatniego byłaby jednym z kryteriów oceny stanu technicznego obrabiarki używanej i ewentualnie byłaby podstawą do zakwalifikowania śruby pociągowej i nakrętki do wymiany.

5.8. W odniesieniu do metody pomiaru łańcucha podziału frezarki obwiedniowej nasuwają się następujące spostrzeżenia:

- metoda może być używana dla celów praktycznych ze względu na prostotę pomiaru i mały koszt urządzeń pomiarowych;
- aby uzyskać wykres błędów zbliżony w maksymalnym stopniu do obrazu rzeczywistego należy stosować podział obwodu na dużą ilość części;
- istnieje koncepcja pomiaru błędów kinematycznych w sposób ciągły przy użyciu wzorca. Układ pomiarowy stanowiłoby wzorcowe koło zębate, zamocowane na stole frezarki obwiedniowej w sposób umożliwiający obrót koła względem stołu, współpracujące z wzorcowym ślimakiem zamocowanym we wrzecionie. Przemieszczenia kątowe koła wzorcowego względem stołu frezarki, stanowiące wartość błędu kinematycznego, mogłyby być mierzone i rejestrowane.

LITERATURA

[1] Gwiazdowski W.: Kinematyka obrabiarek, WNT Warszawa 1965.

[2] Schlesinger G.: Prüfbuch für Werkzeugmaschinen. Vierte Auflage, Middelburg 1949.

[3] Owsiński A., Batsch A.: Metody pomiaru dokładności kinematycznej obrabiarek. Mechanik 1966. Zeszyt specjalny.

[4] Polska Norma PN/M-55652: Obrabiarki do metali. Sprawdzanie dokładności geometrycznej.

[5] Perzyna F.: Dokładność obrabiarek do metali i sposoby jej uzyskania. PWT Warszawa 1953.

ИЗМЕРЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ СТАНКОВ

Р е з ю м е

В статье описывается влияние различных факторов на возникновение погрешностей внутренних кинематических цепей станков для обмоток и зубьев и способы измерения этих погрешностей. При помощи спроектированных и изготовленных в Кафедре Металлорежущих Станков Силезского Политехнического Института приборов были проведены измерения и регистрация кинематических погрешностей цепи формирования винтовой линии на токарном станке и делительной цепи фрезерного станка работающего по методу обкатки.

Затем был произведен анализ выступающих погрешностей и в выводах был предложен другой критерий определения точности кинематических цепей шпиндель - ходовой винт на токарных станках, чем это было до сих пор предусмотрено Польскими Стандартами.

TESTS ABOUT THE KINEMATIC ACCURACY OF THE MACHINE TOOLS

S u m m a r y

The article concerns with the problem of different causes of unexactness in internal kinematic chains of machine tools destined for machining the srew threads or tooth gears. There are described the methods of checking these errors. By aid of the arrangement designed and manufactured by the staff of Machine Tool Chair of the Technical University of Silesia are performed registerd tests of kinematic errors in internal gearing drives by machining helical threads on the center lathe, and of the gear pitch on the gear hobbing machine.

Thenafter are the checked errors analytically considered, and in conclusion are proposed new criterions for determining the gearing accuracy between the lathe spindle and lead-screw that differ from the Polish Standards.