

OCENA TESTU QC10 DO KONTROLI OFF-LINE OBRABIAREK STEROWANYCH NUMERYCZNIE CNC

EVALUATION OF QC10 BALLBAR DIAGNOSTICS METHOD FOR CNC MACHINE

W pracy przedstawiono wyniki badań diagnostycznych obrabiarki CNC. Dokonano analizy wybranych błędów obrabiarki CNC identyfikowanych za pomocą pręta teleskopowo kulowego. Ocenie jakościowej poddano typowe odchyłki geometryczne, takie jak: odchyłkę okrągłości, odchyłkę prostopadłości osi, odchyłkę okresową. W trakcie pomiarów wyznaczono ponadto błąd nawrotu i luz zwrotny w badanej osi. Wskazano na zalety oraz wady szybkiego testu QC10. Omówiono przyczyny powstawania badanych błędów oraz wskazano podstawowe sposoby ich minimalizacji. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów i tabel.

Słowa kluczowe: obrabiarka CNC, dokładność geometryczna obrabiarki, diagnostyka obrabiarek, odchyłka okrągłości, odchyłka prostopadłości osi, luz zwrotny, błąd nawrotu, kompensacja błędów.

This paper presents results of CNC machine tool testing. Analyses of error were performed with ballbar method. This method allowed to investigate geometric errors as circularity, squariness, straightness as well as reversal spikes and backlash. Evaluated errors were discussed and compensation procedures were proposed. Obtained results were described in tables and figures.

Keywords: CNC machine, geometric accuracy, diagnostic of machine, circularity, squariness error, backlash, reversal spikes, error compensation.

1. Wprowadzenie

Zastosowanie maszyn CNC w obróbce wiórowej pozwala na konstytuowanie nowej powierzchni o dużej dokładności geometrycznej. W celu uniknięcia błędów związanych z zarysem geometrycznym oraz zapewnienie uzyskiwania maksymalnych wartości wskaźników jakościowych wyrobu, konieczna jest szybka i stosunkowo częsta diagnostyka maszyn CNC [1-4].

Diagnostyka obrabiarek sterowanych numerycznie jest bardzo ważnym zagadnieniem, które powinno być rozpatrywane zarówno przez producentów jak również użytkowników maszyn. Istnieje wiele metod i technik diagnostyki maszyn technologicznych. Bazują one na dynamicznych i semistatycznych procesach resztkowych. Do oceny stanu maszyny wykorzystywane są łatwo mierzalne wielkości fizyczne, skorelowane z różnymi typami błędów obrabiarki [7, 8, 21-23]. Wielkościami tymi są np.: drgania, emisja akustyczna, ciepło itp. [7]. Badania dokładności obrabiarek są znormalizowane i opisane w Normie Międzynarodowej ISO 230 (z ang. Acceptance code for machine tools), która jest zatwierdzona przez Polski Komitet Normalizacyjny. Polskie Normy PN-ISO 230 [14] określają zarówno ogólne przepisy badania obrabiarek, jak i szczegółowe metody wyznaczania poszczególnych odchyłek oraz tolerancje ograniczające ich dopuszczalne wartości. Nowoczesne metody sprawdzania dokładności obrabiarek obejmują trzy grupy błędów: dynamiczne, geometryczne oraz luzy [7, 19]. Spośród urządzeń pozwalających na sprawdzanie dokładności geometrycznej obrabiarek CNC można wyróżnić: QC10 ballbar, Cross Grid, R-test, HMS - Head Measuring System opatentowany przez firmę Fidia [5, 15, 17, 18, 20].

1. Introduction

The application of CNC machine tools in cutting allows for creation of a new surface of high geometrical accuracy. CNC machine tool has recently been treated as standard in manufacturing industry, because it allows for machining of complicated shapes of workpiece. Depending on condition of the machine, final products can be inaccurate though. A lot of error sources of machine may have influence on accuracy of machining performance. In order to avoid errors related to geometrical outline and in order to achieve maximum values of quality indexes of a product and a frequent and quick CNC machine tool diagnostics is necessary. In order to achieve satisfied accuracy it is very important to check machine accuracy periodically [1-4].

Machine diagnostics is very important not only for final users, but also machine manufacturers should test it on production level. There are several diagnostic methods and techniques used for this purpose. They are based on dynamic and semi-static residual processes. Evaluation of machine tool accuracy applies easily measurable physical values correlated with the most common errors of machine tools [7, 8, 21-23], such as: vibration, acoustics, heat, etc [7]. Also international standards fully described the machine tool errors evaluation method. The most common is ISO230 titled Standards Acceptance code for machine tools [14], which is accepted by Polish Committee for Standardization. The Polish Norm PN-ISO 230 describes not only general rules of CNC machine tool measurement, but also detailed methods of particular errors determination and tolerance of its maximum acceptable value. Modern testing methods of CNC machine tool error measurement cover three sources

Oceny dokładności geometrycznej obrabiarki dokonuje się często z wykorzystaniem technik laserowych (interferometria laserowa) [6, 7]. Nie mniej jednak techniki te są stosunkowo czasochłonne i kosztochłonne. Ponadto interpretacja uzyskanych wyników i ich wykorzystanie praktyczne może być kłopotliwe i trudne, chociażby z uwagi na licznosc czynników wpływających na sam proces pomiaru, jego dokładność a czasami nawet dokładność wykonywanych obliczeń.

Istotnym ograniczeniem metod interferometrycznych w pomiarach maszyn jest dosyć duża czasochłonność ustawienia optyki interferometru, zwłaszcza dla maszyn o zakresach obróbczych powyżej kilku metrów. Niewątpliwą zaletą metod interferometrycznych jest możliwość pomiaru całej osi obróbczej i uzyskanie informacji o błędach w pełnym zakresie przesuwów [6, 7].

Dla uzyskania wymaganej dokładności realizowanych ruchów i precyzji zajmowanych położeń, nie wystarczy tylko naprawa bieżących usterek. Konieczne staje się okresowe badanie diagnostyczne połączone z ewentualną regulacją np. układów sterowania, napędów, itp. Alternatywę dla klasycznych metod diagnostycznych obrabiarek CNC stanowi zautomatyzowany szybki test kołowości realizowany przez urządzenie QC10 ballbar [5, 9, 12, 14, 24]. Norma ISO 230-2 opisuje to urządzenie jako pręt teleskopowo kulkowy [14]. W artykule nazwy te będą stosowane zamiennie.

System QC10 ballbar pozwala na szybką i efektywną ocenę niedokładności obrabiarek. W efekcie umożliwia podjęcie działań serwisowych i obsługi technicznej na podstawie zaobserwowanego - bieżącego stanu technicznego. Stosowanie szybkiego testu diagnostycznego QC10 pozwala na dokumentowanie stanu technicznego obrabiarek, porównywanie i klasyfikowanie różnych obrabiarek według ich zdolności do zapewnienia odpowiedniej dokładności obróbki. Jest to szczególnie ważne w przedsiębiorstwach z dużym parkiem maszynowym gdyż pozwala na przenoszenie zadań obróbkowych wyrobów o wysokich wymaganiach jakościowych na te maszyny, które umożliwiają zachowanie wysokiej dokładności wymiarowo-kształtowej [10, 11, 13, 16, 19].

2. Metodyka badań

Charakterystyka urządzenia diagnostycznego QC-10 ballbar

Urządzenie diagnostyczne QC10 ballbar (rys. 1) umożliwia wykrywanie błędów geometrycznych występujących w układach napędowych obrabiarek CNC, zwłaszcza wprowadzanych przez układ mechaniczny, układ pomiarowy oraz błędów wprowadzanych przez serwonapędy.

Spośród najważniejszych odchylek identyfikowanych podczas testu urządzeniem QC10 ballbar należy wymienić: odchyłkę okrągłości, odchyłkę prostopadłości osi, odchyłkę okresową oraz błąd nawrotu, luz zwrotny w badanej osi i luz poprzeczny.

Wśród pozostałych błędów identyfikowanych przez system QC10 ballbar są: błąd prostoliniowości, błąd cykliczny, błąd spirali, błąd skali, błąd nadążania, zmianę offsetu, zmianę pro-

of machine tools errors: dynamic, geometric and play errors [7, 19]. The most popular ones are QC10 ballbar, Cross Grid, R-test, HMS-Head measuring system [5, 15, 17, 18, 20]. Mentioned HMS system manufactured by Fidia, is a fully automated measuring system which can be used for evaluation of linear and rotary axes. This measuring device can evaluate static and dynamic errors. For evaluation of geometric errors also laser interferometers are commonly used [6, 7]. This method is most time consuming and quite expensive in comparison to other diagnostics methods. Moreover, the result interpretation and its application may be confusing and difficult, due to multiple factors of measurement process, its accuracy as well as accuracy of performed measurement itself. A significant limitation in CNC machine tool measurement is a relatively big time consumption of setting of interferometer optics especially for CNC machine tool with machining scope of several meters. Undoubtedly, its advantages are the possibility of measurement of total CNC machine tool axis and collection of information about errors within the total measurement scope. Obtained results clearly describe the machine's geometric errors. Interferometer method is also fundamental in case of calibration linear positioning for CNC machine [6, 7].

In order to obtain the acceptable accuracy of machine tools (movements, positioning, etc.) it is very important to perform some procedures for timely diagnostics of the machine as well as correction of parameters. The alternative for classical diagnostic methods of CNC machine tools is an automated, quick, QC10 ballbar circularity test which is fully consistent with ISO 230-2 standards [5, 9, 12, 14, 24]. ISO 230 describes the tool as a ballbar transducer (ball telescoping bar) [14]. For the purpose of the paper both names are used interchangeably.

QC10 ballbar system provides the method for quick and effective of inaccuracy of CNC machine tools. In effect, it allows for undertaking of service activity and technical service on the basis of observed, current technical condition. It also allows for detecting inaccuracies induced by its controller and servo drive systems. After the QC10 ballbar test has been carried out, the system produces a diagnostic plot. This can be analysed – either visually or by using the software – to identify specific errors within the machine tool. The QC10 ballbar system is also a proper system for assessment of the most accurate machine from the whole stock of machine tools and choice of a proper machine for corresponding task [10, 11, 13, 16, 19].

2. Research methodology

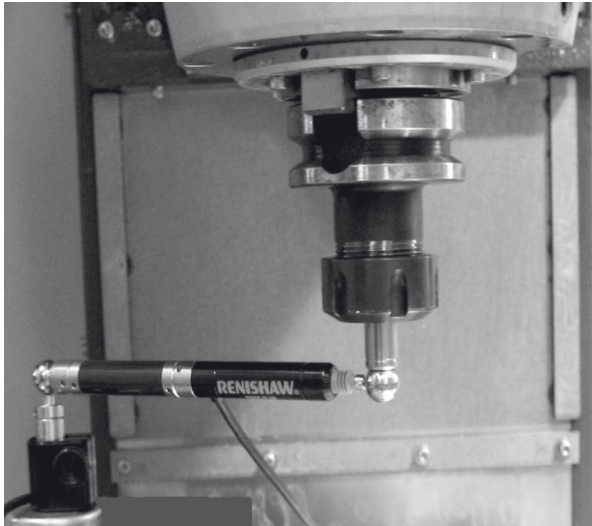
QC10 ballbar system overview

QC10 ballbar system (fig. 1) allows for evaluation of geometric errors, resulting from servo mechanisms and mechanical mechanisms, measurement systems and other errors. As shown in fig. 1, the detecting part of ballbar consists of two precise balls connected to a bar made of tungsten carbide. The two balls are magnetically attracted on 3 point supported sockets. The most important errors identified during test by QC10 ballbar system are: circularity error, squareness error, cyclic error, reversal-spikes error, backlash error and radial clearance. Among other errors identified by QC10 ballbar system are: linearity error, spiral error, scaling error and mismatch, offset change, radius change and other. Measurement and interpretation of the results are completed according to provisions of ISO-230-4 [14]. Quick QC10 ballbar system test allows for measurement of circu-

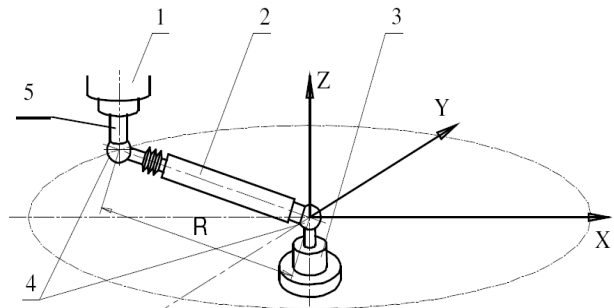
mienia i inne. Pomiar i interpretacja wyników są realizowane zgodnie z wytycznymi normy PN-ISO 230-4 [14].

Szybki test urządzeniem QC10 ballbar pozwala na pomiar odchyłki okrągłości ruchu w interpolacji kołowej obrabiarki sterowanej numerycznie (rys. 1).

a)



b)



Rys. 1. Zasada pomiaru diagnostycznego frezarek CNC szybkim testem QC10 ballbar [7]: a) widok ogólny, b) schemat i zasada przygotowania do testu; 1 – wrzeciono frezarki, 2 – przetwornik pomiarowy (teleskopowy pręt kinematyczny), 3 – podstawa magnetyczna centrująca, 4 – końcówki kuliste, 5 – uchwyt magnetyczny, R – promień zarzysu nominalnego

Fig. 1. Principle of ballbar measurement [7]: a) general view, b) QC10 ballbar system; 1 – machine spindle, 2 – ballbar transducer, 3 – magnetic base, 4 – ball assembly, 5 – tool cup assembly, R – radius of the test

W czasie pomiaru za pomocą przetwornika pomiarowego 2 (pręt teleskopowo kulowy) mierzony jest aktualny promień wykonywanego ruchu kołowego. Aktualne położenie katowe przetwornika obliczane jest na podstawie czasu wykonywania ruchu ze stałym posuwem stycznym. Do wykonania poprawnej analizy dokładności geometrycznej obrabiarki wymagane jest wykonanie pomiarów w zakresie ruchu 360° (0÷360°), w obu kierunkach (zgodnie i przeciwnie do ruchu wskazówek zegara), co przedstawiono na rys. 2. Aby w czasie pomiaru była zachowana stała prędkość ruchu posuwowego v_f , każdy właściwy ruch pomiarowy powinien być poprzedzony rozbiegiem i zakończony wybiegiem (rys. 2).

Jeżeli dana obrabiarka CNC nie wykazuje błędów, wykres kołowy realizowanego ruchu powinien być idealnym okręgiem. Obecność jakichkolwiek błędów obrabiarki wprowadza zniekształcenia i odstępstwa od okręgu idealnego. Analizując taki wykres można określić źródła występowania tych błędów w układzie napędowym.

Dostarczone oprogramowanie do urządzenia QC-10 ballbar umożliwia przeprowadzenie analizy otrzymanych wyników, podając wartości poszczególnych błędów składowych oraz ich procentowy wpływ na całkowitą odchyłkę okrągłości.

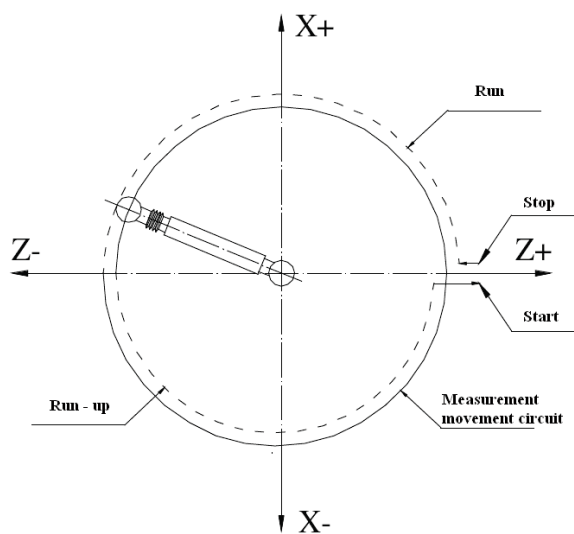
of feed-rate, every proper measurement movement should be initiated with warming-up run and accomplished by overrun.

The changes in distance between two balls are read out by the LVDT transducer and the obtained signals are transformed and shown as the radius changes in ballbar software. The numerical values from the counter are processed by PC and the deviation from the base circle is plotted as motion error trace by a X-Y plot shown in fig. 2.

In this measuring method the rotating angle is not detected. Instead the apparent rotating angle is calculated from the circumferential feed - rate of the circular interpolation motion v_f .

If the machine accuracy is perfect, circular plot will appear as the ideal circle. Errors of machines give some distortion in circular plot. Fig. 3 describes the installation method on typical machine tool. The analysis of such figure may help to determine sources of errors occurrence in servo mechanism. The software of QC10 ballbar system allows for analysis of results, giving values of particular partial errors and percentage influence on summary circularity error.

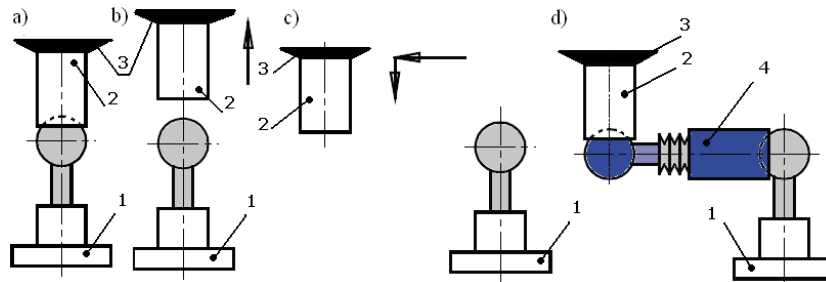
It is possible to measure full circle 360° but also 180° test. Test arcs smaller than 180° are not recommended and sho-



Rys. 2. Schemat pomiaru w zakresie ruchu 360° [7]

Fig. 2. Ballbar operation in whole circle [7]

Instalacja urządzenia QC-10 ballbar na frezarkach przebiega w sposób przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Schemat instalacji urządzenia QC-10 na frezarkach CNC [7]: a) ustawienie punktu bazowego, b) pionowe odsunięcie gniazda, c) ustawienie w pozycji startowej, d) instalacja przetwornika, 1 - podstawa magnetyczna, 2 - uchwyty magnetyczne, 3 - tulejka zaciskowa, 4 - przetwornik pomiarowy (teleskopowy pręt kinematyczny)

Fig. 3. QC10 ballbar mounting procedure [7]: a), b) centering, c) move to initial position, d) transducers mount, 1 - magnetic base, 2 - tool cup assembly, 3 - tool holder, 4 - measuring transducer

Pomiary kołowości można wykonywać również w innym zakresie ruchu niż 360° , np. w zakresie ruchu $-180^\circ \div 180^\circ$; $0^\circ \div 90^\circ$; $80^\circ \div 100^\circ$ itd. Jednakże wykonanie niepełnego okręgu ogranicza możliwości diagnostyczne urządzenia jedynie do interpretacji graficznej zmian promienia.

Przebieg badań

Celem nadrzędnym pracy jest identyfikacja i ocena ilościowa sześciu głównych odchyłek oraz błędów obrabiarki CNC. Główny cel pracy stanowi również określenie związków pomiędzy parametrami testu a wynikami pomiarów diagnostycznych. W pracy zostanie zawarta ilościowa i jakościowa ocena wpływu prędkości ruchu posuwowego stołu frezarki v_f na wartość błędów nawrotu. Celem pośrednim pracy jest wykazanie przydatności szybkiego testu diagnostycznego QC10 ballbar w okresowych badaniach stanu obrabiarki CNC.

Wśród najważniejszych odchyłek i błędów obrabiarki CNC należy wyróżnić odchyłkę okrągłości, definiowaną przez normę ISO 230-4 następująco: „linię na płaszczyźnie nazywa się okrągłą jeśli wszystkie jej punkty są zawarte między dwoma okręgami współśrodkowymi, których odległość promieniowa nie przekracza danej wartości”. Pozostałe błędy obrabiarki CNC identyfikowane w teście za pomocą pręta teleskopowo kulkowego składają się na odchyłkę okrągłości. Wśród nich wyróżnia się odchyłkę prostopadości osi, błąd nawrotu, luz zwrotny w badanej osi, luz poprzeczny.

Prace eksperymentalne realizowano na czteroosiowym, pionowym centrum obróbkowym (frezarskim) wyposażonym w system sterowania numerycznego FANUC. W celu poprawnego wykonania badania diagnostycznego wykonano następujące czynności:

- określono płaszczyznę pomiarów (płaszczyzna X-Y),
- wyznaczono miejsca pomiarowe na stole frezarki (4 położenia w układzie kwadratu),
- zdefiniowano wartości prędkości ruchu posuwowego stołu frezarki ($v_f = 500; 1000; 3000$ mm/min),
- określono wartość promienia interpolowanego okręgu, dobierając odpowiednią długość teleskopowego pręta kinematycznego ($R = 100$),
- określono kąt realizacji testu: 360° ,
- zdefiniowano wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej obrabiarki i jej temperaturę,

uld only be used where space constraints prevent a 180° or 360° test. Test arcs of less than 90° should not be used. However,

the performance of an incomplete circle, limits the diagnostics capability of the measurement system only to graphics presentation and interpretation of radius change.

Run of tests

The main task in research was to diagnose the machine tool as well as to describe interactions between test parameters and errors evaluated by ballbar system. Additional task was to research influences between feed-rate of machine and reversal spikes errors. Another task in this research was to prove usefulness of the device QC10. One of the most significant parameters of accuracy is circularity, defined by ISO 230 standard. Circularity is defined as the difference between the largest and smallest radius recorded by the ballbar as the machine moves around the larger circularity value. The diagnostics analysis can be used to identify the cause of any circularity error, providing the test is performed over a complete 360° . Experimental results did on 4-axis vertical machine tool with FANUC controller. Measuring procedure was performed as follows:

- test plane X-Y was defined,
- proper place on machine (4 locations in square plane) was determined,
- feed-rate of vertical CNC machine tool table v_f as: 500; 1000; 3000 mm/min was determined,
- circle radius of the test $R=100$ mm, adjusting the proper length of the telescopic kinematic bar, was defined,
- radius of the full tests 360° was defined,
- the material expansion coefficient of machine tool and its temperature was defined,
- to machine control system the CNC programme completing the measurement path was introduced (fig. 2)
- the QC10 ballbar on the machine plate was mounted (fig. 3),
- the software parameters were prepared,
- the test was performed,
- the measurement of results was analyzed and it was presented on graphs and in the table,
- main errors were defined and their quality analysis was performed,
- the test 4 - series and 5 - repeatable series were completed.

- do układu sterowania obrabiarki CNC wprowadzono odpowiedni program realizujący ruch pomiarowy (rys. 2),
- zamontowano przetwornik pomiarowy na stole frezarki (teleskopowy pręt kinematyczny) (rys. 3),
- ustawiono odpowiednie parametry zbierania danych w środowisku programu Ballbar,
- przeprowadzono pomiar właściwy,
- przeanalizowano wyniki pomiarów oraz przedstawiono je w postaci wykresów oraz zestawień tabelarycznych.
- określono rodzaje występujących odchyłek oraz błędów oraz dokonano ich oceny ilościowej,
- pomiary realizowano w czterech seriach (cztery położenia) z 5 powtórzeniami.

W efekcie realizowanych pomiarów uzyskano wyniki badań (raport testu diagnostycznego), które poddano szczegółowej analizie. Raport testu diagnostycznego zawiera wszystkie znaczące wartości wyznaczonych błędów i odchyłek oraz ich procentowe udziały w całkowitej odchyłce okrągłości obrabiarki CNC.

3. Analiza wyników pomiarów

W oparciu o przeprowadzone badania eksperymentalne oraz pomiary otrzymano wyniki pozwalające na częściową ocenę stanu obrabiarki (badania przeprowadzono w płaszczyźnie X-Y). W tabelach 1 oraz 2 przedstawiono wartości głównych odchyłek i błędów obrabiarki sterowanej numeryczni CNC oraz ich udziały procentowe w sumarycznej odchyłce okrągłości.

Rys. 4. przedstawia procentowe udziały sześciu znaczących odchyłek i błędów obrabiarki CNC. Z przedstawionego na rys. 4 wykresu wynika, że największą wartość średniego procentowego udziału stanowi odchyłka prostopadłości osi (14,5%).

Efektom występowania na obrabiarce odchyłki prostopadłości jest brak wzajemnej prostopadłości frezowanych płaszczyzn (rys. 5). Brak prostopadłości osi przyczynia się również do istotnych problemów związanych z kształtowaniem powierzchni cylindrycznych, zarówno zewnętrznych jak i wewnętrznych.

Występowanie odchyłki prostopadłości wynika ze złego wzajemnego ustawienia prowadnic osi X i Y, zużycia prowad-

The result of completed measurement was put under detailed analysis. The report of diagnostic test includes all important values of errors and their percentage participation in the total circularity error of CNC machine tool.

3. Analysis of the test results

On the basis of the conducted research and measurement the results was received. It allows for partial assessment of the CNC machine tool. In table No. 1 and No. 2 average errors of CNC machine tool and their percentage participation in summary circularity squareness error were presented. Test results were performed for X-Y plane. Percentage screen provides a polar plot of captured data followed by diagnosis of errors. The plot exhibits the magnitude of errors. They are listed in percentage terms and shown in fig. 4. Percentages indicate what proportion of the overall non-circularity error can be attributed to the diagnosed errors. These are listed in a priority order with the largest error on top. From the percentage screen we know that the most important errors were influenced by squareness error (14.5%).

The squareness error is caused when the X and Y axes of the machine are not at 90° to one another at the position on the machine where the test is being performed. The lack of the squareness error of axis may cause severe errors related to

Tab. 1. Średnie wartości odchyłek i błędów obrabiarki CNC dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y
Tab. 1. Average errors of CNC machine tool for four groups of tests in plane X-Y

	Długość ramienia teleskopowego pręta kinematycznego: R = 100 mm, kąt realizacji testu: 360° Ballbar radius: R = 100 mm, data capture arc: 360°				
	Test	1	2	3	4
Odchyłka prostopadłości Squareness error	µm/m	65.6	45.3	85.5	65.8
	%	18	10	16	14
Luz zwrotny Y Backlash Y	µm	↑-3.8 ↓-5.7	↑-4.6 ↓-3.9	↑-3.5 ↓-5.5	↑-3.5 ↓-5.8
	%	16	10	10	12
Odchyłka okresowa Y Cyclic error Y	µm	↑5.8 ↓6.1	↑4.0 ↓4.1	↑6.1 ↓6.0	↑5.7 ↓5.5
	%	17	9	11	12
Błąd nawrotu X Reversal spikes X	µm	→0.0 ←-2.7	→2.6 ←-1.9	→3.8 ←-3.0	-
	%	7	10	13	-
Błąd nawrotu Y Reversal spikes Y	µm	↑0.0 ↓2.7	↑-5.0 ↓0.0	↑-4.3 ↓3.0	↑-5.3 ↓0.0
	%	7	11	14	11
Odchyłka okrągłości / Circularity	µm	20.4	17.1	23.9	22.1

Tab. 2. Średnie wartości odchyłek i błędów obrabiarki CNC wyznaczone przy różnych wartościach prędkości ruchu posuwowego stołu frezarki w płaszczyźnie X-Y

Tab. 2. Average error values versus feed rate of machine for XY plane test

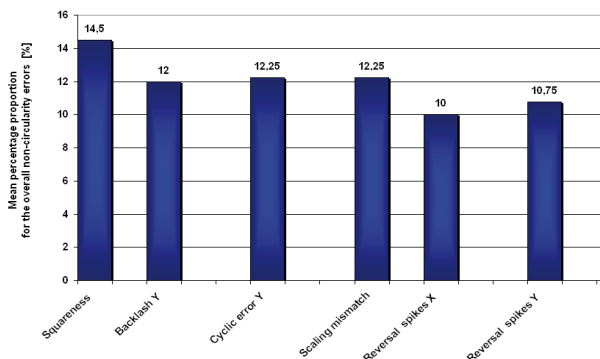
		Długość teleskopowego pręta kinematycznego: R = 100mm, Kąt realizacji testu: 360° Ballbar radius: R = 100 mm, data capture arc: 360°		
		Prędkość ruchu posuwowego v_f [mm/min] / Velocity of the test v_f [mm/min]		
		500	1000	3000
Odchyłka prostopadłości Squarness error	$\mu\text{m/m}$	84.1	65.8	73.7
	%	17	14	14
Luz zwrotny Y Backlash Y	μm	\uparrow -3.5 \downarrow -5.3	\uparrow -3.5 \downarrow -5.8	\uparrow -3.0 \downarrow -5.5
	%	11	12	10
Odchyłka okresowa Y Cyclic error Y	μm	\uparrow 6.3 \downarrow 5.8	\uparrow 5.7 \downarrow 5.5	\uparrow 5.0 \downarrow 5.3
	%	13	12	10
Różnica odchyłki pozycjonowania Scaling error	μm	8.4	10.8	9.9
	%	9	12	9
Błąd nawrotu Y Reversal spikes Y	μm	\uparrow -4.4 \downarrow 2.4	\uparrow -5.3 \downarrow 3.0	\uparrow -6.6 \downarrow 3.2
	%	14	11	18
Odchyłka okrągłości Circularity	μm	22.9	22.1	21.9
	Średnia odchyłka okrągłości 22,3 / Average Circularity 22.3			

nic lub ich odkształceń sprężystych oraz cieplnych. Przyczyną powstawania odchyłki prostopadłości może być również niewłaściwe lub nieprecyzyjne wypoziomowanie stołu obrabiarki. Jednak, w trakcie badań objętych zakresem pracy, po wykonaniu pomiarów na różnych wysokościach w kierunku osi Z przyczyna ta została wykluczona. Świadczy o tym powtarzalny charakter błędu na każdej z badanych wysokości.

Odchyłka prostopadłości może mieć charakter lokalny ale również może występować na całej długości osi. Wynikają stąd różne podejścia jej minimalizacji. W przypadku lokalnych odchyłek prostopadłości osi, jako sposób przeciwdziałania błędom obróbki wynikającym z odchyłki prostopadłości jest unikanie obróbki w miejscach, w których odchyłka prostopadłości osi obrabiarki osiąga wysokie wartości. Wymaga to jednak przebadania pozostałych obszarów stołu w przestrzeni roboczej oraz identyfikacji i właściwej interpretacji braku prostopadłości osi. W przypadku występowania odchyłki prostopadłości na całej długości, środkiem zaradczym pozostaje korekta ustawienia prowadnic, zaś w ostateczności - przy dużym zużyciu pro-

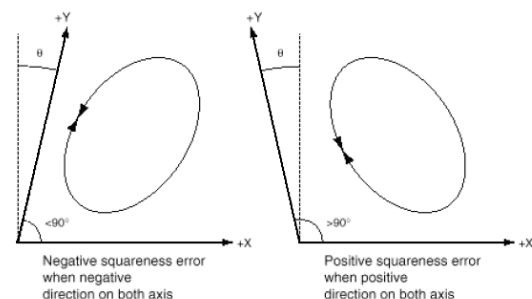
the cylindrical construction surface, both external and internal (fig. 5). The axes may be bent locally or there may be an overall axis misalignment in the machine.

The axes X-Y of the machine tool may be drooping causing them to misalign at certain locations. The machine guideways may be worn excessively causing certain amount of play in the axes when they move, its flexibility and thermal displacement. The cause of squarness error may be also improper or imprecise plane leveling. However, during research, after measurement on different level, directed towards X axis, the reason was eliminated. It can be justified by the same character of an error on each height. The value is the angle between the two axes in the test plane, less than 90°. Ideally, the two axes should be perfectly perpendicular to each other, this would result in a squarness error of zero value. The squarness error may have local character but it may also occur in the whole axis' length. Different ways of its minimization result from it. As a way of prevention from machining errors, the avoidance of cutting process in places where the error value is big, is suggested. It



Rys. 4. Średni procentowy udział sześciu znaczących odchyłek i błędów obrabiarki CNC w całkowitej odchyłce okrągłości

Fig. 4. Average percentage proportion for the significant non-circularity errors of CNC machine tool in overall circularity error



Rys. 5. Efekt wpływu ujemnej $\theta < 90^\circ$ i dodatniej $\theta > 90^\circ$ odchyłki prostopadłości osi na wzajemne położenie kształtowanych płaszczyzn [18]

Fig. 5. Typical squareness errors and its influence on circularity plot [18]

wadnic, ich wymiana. Podstawową odchyłką wpływającą na dokładność wymiarowo kształtową wytwarzanych na obrabiarkach CNC wyrobów jest identyfikowana w teście kołowości systemem QC10 ballbar odchyłka okrągłości. Na rys. 6 przedstawiono przebieg zmian odchyłki okrągłości w zestawieniu z odchyłką prostokątności osi. Przyczyną występowania odchyłki okrągłości mogą być także niewłaściwie dobrane napędy obrabiarki CNC, błędy sterowania oraz błędy układów pomiarowo kontrolnych obrabiarki. Podstawową czynnością jaką należałoby wykonać w celu minimalizacji odchyłki okrągłości jest doprowadzenie do prostokątności osi, regulacja napędów oraz wyeliminowanie zakłóceń sterowania. Ponadto minimalizacja poszczególnych rodzajów błędów spowoduje zmniejszenie odchyłki okrągłości obrabiarki CNC.

Na rys. 7 zaprezentowano charakter zmian średnich wartości luzu zwrotnego dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y. Z przedstawionego zestawienia wynika, że dla testów 1, 3 i 4 charakter zmian i wartość luzu zwrotnego są powtarzalne, zaś w teście drugim wyniki odbiegają od obserwowanego trendu.

Luz zwrotny jest efektem luzów w układzie napędowym obrabiarki lub w układzie pomiarowym (luz w połączeniu śruba-nakrętka, zużycie przekładni). Przyczyną powstawania luzu zwrotnego może być również luz w przekładni zębatej układu napędowego, prowadnicach lub złe naciągnięcie paska zębatego czy też niedostateczna sztywność układów. Luz zwrotny w przypadku jego dodatniej wartości objawia się występowaniem krótkich odcinków prostych (płaszczyzn) w trajektorii ruchu frezu w czasie prowadzenia obróbki w interpolacji kołowej (rys. 8).

W efekcie dochodzi do przerwy ruchu podczas zmiany kierunku działania napędu posuwu w konkretnej osi (Y lub X). Zasadniczą czynnością minimalizującą wartość luzu zwrotnego jest wykasowanie luzów w układzie napędowym (prowadnic, śruby, itp.) i pomiarowym, kompensacja bezpośrednio w układzie sterującym obrabiarki a ostatecznie wymiana uszkodzonych lub zużytych elementów obrabiarki.

Na rys. 9 zaprezentowano przykładowy przebieg zmian wartości błędu nawrotu dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y.

Z zaprezentowanego na rys. 9 wykresu wynika, że wszystkie testy wykonane dla badanej obrabiarki CNC zachowują powtarzalny charakter zmian oraz mają zbliżone wartości w poszczególnych próbach. Objawem błędu nawrotu jest chwilowy

wymiarowo kształtową wytwarzanych na obrabiarkach CNC wyrobów jest identyfikowana w teście kołowości systemem QC10 ballbar odchyłka okrągłości. Na rys. 6 przedstawiono przebieg zmian odchyłki okrągłości w zestawieniu z odchyłką prostokątności osi. Przyczyną występowania odchyłki okrągłości mogą być także niewłaściwie dobrane napędy obrabiarki CNC, błędy sterowania oraz błędy układów pomiarowo kontrolnych obrabiarki. Podstawową czynnością jaką należałoby wykonać w celu minimalizacji odchyłki okrągłości jest doprowadzenie do prostokątności osi, regulacja napędów oraz wyeliminowanie zakłóceń sterowania. Ponadto minimalizacja poszczególnych rodzajów błędów spowoduje zmniejszenie odchyłki okrągłości obrabiarki CNC.

Na rys. 7 zaprezentowano charakter zmian średnich wartości luzu zwrotnego dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y. Z przedstawionego zestawienia wynika, że dla testów 1, 3 i 4 charakter zmian i wartość luzu zwrotnego są powtarzalne, zaś w teście drugim wyniki odbiegają od obserwowanego trendu.

Luz zwrotny jest efektem luzów w układzie napędowym obrabiarki lub w układzie pomiarowym (luz w połączeniu śruba-nakrętka, zużycie przekładni). Przyczyną powstawania luzu zwrotnego może być również luz w przekładni zębatej układu napędowego, prowadnicach lub złe naciągnięcie paska zębatego czy też niedostateczna sztywność układów. Luz zwrotny w przypadku jego dodatniej wartości objawia się występowaniem krótkich odcinków prostych (płaszczyzn) w trajektorii ruchu frezu w czasie prowadzenia obróbki w interpolacji kołowej (rys. 8).

W efekcie dochodzi do przerwy ruchu podczas zmiany kierunku działania napędu posuwu w konkretnej osi (Y lub X). Zasadniczą czynnością minimalizującą wartość luzu zwrotnego jest wykasowanie luzów w układzie napędowym (prowadnic, śruby, itp.) i pomiarowym, kompensacja bezpośrednio w układzie sterującym obrabiarki a ostatecznie wymiana uszkodzonych lub zużytych elementów obrabiarki.

Na rys. 9 zaprezentowano przykładowy przebieg zmian wartości błędu nawrotu dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y.

Z zaprezentowanego na rys. 9 wykresu wynika, że wszystkie testy wykonane dla badanej obrabiarki CNC zachowują powtarzalny charakter zmian oraz mają zbliżone wartości w poszczególnych próbach. Objawem błędu nawrotu jest chwilowy

wymiarowo kształtową wytwarzanych na obrabiarkach CNC wyrobów jest identyfikowana w teście kołowości systemem QC10 ballbar odchyłka okrągłości. Na rys. 6 przedstawiono przebieg zmian odchyłki okrągłości w zestawieniu z odchyłką prostokątności osi. Przyczyną występowania odchyłki okrągłości mogą być także niewłaściwie dobrane napędy obrabiarki CNC, błędy sterowania oraz błędy układów pomiarowo kontrolnych obrabiarki. Podstawową czynnością jaką należałoby wykonać w celu minimalizacji odchyłki okrągłości jest doprowadzenie do prostokątności osi, regulacja napędów oraz wyeliminowanie zakłóceń sterowania. Ponadto minimalizacja poszczególnych rodzajów błędów spowoduje zmniejszenie odchyłki okrągłości obrabiarki CNC.

Na rys. 7 zaprezentowano charakter zmian średnich wartości luzu zwrotnego dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y. Z przedstawionego zestawienia wynika, że dla testów 1, 3 i 4 charakter zmian i wartość luzu zwrotnego są powtarzalne, zaś w teście drugim wyniki odbiegają od obserwowanego trendu.

Luz zwrotny jest efektem luzów w układzie napędowym obrabiarki lub w układzie pomiarowym (luz w połączeniu śruba-nakrętka, zużycie przekładni). Przyczyną powstawania luzu zwrotnego może być również luz w przekładni zębatej układu napędowego, prowadnicach lub złe naciągnięcie paska zębatego czy też niedostateczna sztywność układów. Luz zwrotny w przypadku jego dodatniej wartości objawia się występowaniem krótkich odcinków prostych (płaszczyzn) w trajektorii ruchu frezu w czasie prowadzenia obróbki w interpolacji kołowej (rys. 8).

W efekcie dochodzi do przerwy ruchu podczas zmiany kierunku działania napędu posuwu w konkretnej osi (Y lub X). Zasadniczą czynnością minimalizującą wartość luzu zwrotnego jest wykasowanie luzów w układzie napędowym (prowadnic, śruby, itp.) i pomiarowym, kompensacja bezpośrednio w układzie sterującym obrabiarki a ostatecznie wymiana uszkodzonych lub zużytych elementów obrabiarki.

Na rys. 9 zaprezentowano przykładowy przebieg zmian wartości błędu nawrotu dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y.

Z zaprezentowanego na rys. 9 wykresu wynika, że wszystkie testy wykonane dla badanej obrabiarki CNC zachowują powtarzalny charakter zmian oraz mają zbliżone wartości w poszczególnych próbach. Objawem błędu nawrotu jest chwilowy

wymiarowo kształtową wytwarzanych na obrabiarkach CNC wyrobów jest identyfikowana w teście kołowości systemem QC10 ballbar odchyłka okrągłości. Na rys. 6 przedstawiono przebieg zmian odchyłki okrągłości w zestawieniu z odchyłką prostokątności osi. Przyczyną występowania odchyłki okrągłości mogą być także niewłaściwie dobrane napędy obrabiarki CNC, błędy sterowania oraz błędy układów pomiarowo kontrolnych obrabiarki. Podstawową czynnością jaką należałoby wykonać w celu minimalizacji odchyłki okrągłości jest doprowadzenie do prostokątności osi, regulacja napędów oraz wyeliminowanie zakłóceń sterowania. Ponadto minimalizacja poszczególnych rodzajów błędów spowoduje zmniejszenie odchyłki okrągłości obrabiarki CNC.

Na rys. 7 zaprezentowano charakter zmian średnich wartości luzu zwrotnego dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y. Z przedstawionego zestawienia wynika, że dla testów 1, 3 i 4 charakter zmian i wartość luzu zwrotnego są powtarzalne, zaś w teście drugim wyniki odbiegają od obserwowanego trendu.

Luz zwrotny jest efektem luzów w układzie napędowym obrabiarki lub w układzie pomiarowym (luz w połączeniu śruba-nakrętka, zużycie przekładni). Przyczyną powstawania luzu zwrotnego może być również luz w przekładni zębatej układu napędowego, prowadnicach lub złe naciągnięcie paska zębatego czy też niedostateczna sztywność układów. Luz zwrotny w przypadku jego dodatniej wartości objawia się występowaniem krótkich odcinków prostych (płaszczyzn) w trajektorii ruchu frezu w czasie prowadzenia obróbki w interpolacji kołowej (rys. 8).

W efekcie dochodzi do przerwy ruchu podczas zmiany kierunku działania napędu posuwu w konkretnej osi (Y lub X). Zasadniczą czynnością minimalizującą wartość luzu zwrotnego jest wykasowanie luzów w układzie napędowym (prowadnic, śruby, itp.) i pomiarowym, kompensacja bezpośrednio w układzie sterującym obrabiarki a ostatecznie wymiana uszkodzonych lub zużytych elementów obrabiarki.

Na rys. 9 zaprezentowano przykładowy przebieg zmian wartości błędu nawrotu dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y.

Z zaprezentowanego na rys. 9 wykresu wynika, że wszystkie testy wykonane dla badanej obrabiarki CNC zachowują powtarzalny charakter zmian oraz mają zbliżone wartości w poszczególnych próbach. Objawem błędu nawrotu jest chwilowy

wymiarowo kształtową wytwarzanych na obrabiarkach CNC wyrobów jest identyfikowana w teście kołowości systemem QC10 ballbar odchyłka okrągłości. Na rys. 6 przedstawiono przebieg zmian odchyłki okrągłości w zestawieniu z odchyłką prostokątności osi. Przyczyną występowania odchyłki okrągłości mogą być także niewłaściwie dobrane napędy obrabiarki CNC, błędy sterowania oraz błędy układów pomiarowo kontrolnych obrabiarki. Podstawową czynnością jaką należałoby wykonać w celu minimalizacji odchyłki okrągłości jest doprowadzenie do prostokątności osi, regulacja napędów oraz wyeliminowanie zakłóceń sterowania. Ponadto minimalizacja poszczególnych rodzajów błędów spowoduje zmniejszenie odchyłki okrągłości obrabiarki CNC.

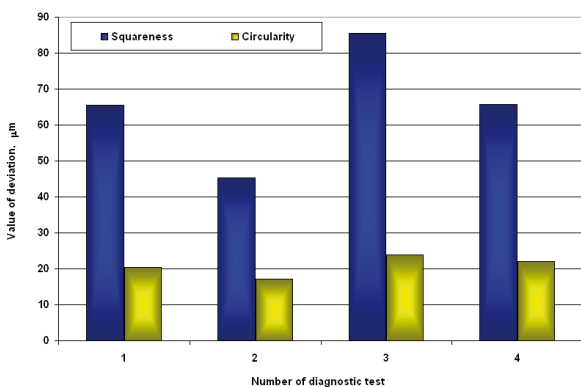
Na rys. 7 zaprezentowano charakter zmian średnich wartości luzu zwrotnego dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y. Z przedstawionego zestawienia wynika, że dla testów 1, 3 i 4 charakter zmian i wartość luzu zwrotnego są powtarzalne, zaś w teście drugim wyniki odbiegają od obserwowanego trendu.

Luz zwrotny jest efektem luzów w układzie napędowym obrabiarki lub w układzie pomiarowym (luz w połączeniu śruba-nakrętka, zużycie przekładni). Przyczyną powstawania luzu zwrotnego może być również luz w przekładni zębatej układu napędowego, prowadnicach lub złe naciągnięcie paska zębatego czy też niedostateczna sztywność układów. Luz zwrotny w przypadku jego dodatniej wartości objawia się występowaniem krótkich odcinków prostych (płaszczyzn) w trajektorii ruchu frezu w czasie prowadzenia obróbki w interpolacji kołowej (rys. 8).

W efekcie dochodzi do przerwy ruchu podczas zmiany kierunku działania napędu posuwu w konkretnej osi (Y lub X). Zasadniczą czynnością minimalizującą wartość luzu zwrotnego jest wykasowanie luzów w układzie napędowym (prowadnic, śruby, itp.) i pomiarowym, kompensacja bezpośrednio w układzie sterującym obrabiarki a ostatecznie wymiana uszkodzonych lub zużytych elementów obrabiarki.

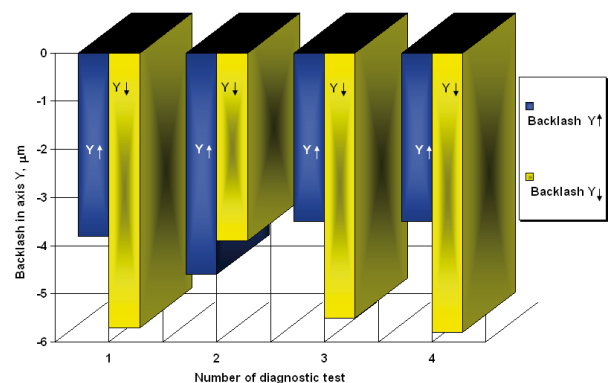
Na rys. 9 zaprezentowano przykładowy przebieg zmian wartości błędu nawrotu dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y.

Z zaprezentowanego na rys. 9 wykresu wynika, że wszystkie testy wykonane dla badanej obrabiarki CNC zachowują powtarzalny charakter zmian oraz mają zbliżone wartości w poszczególnych próbach. Objawem błędu nawrotu jest chwilowy



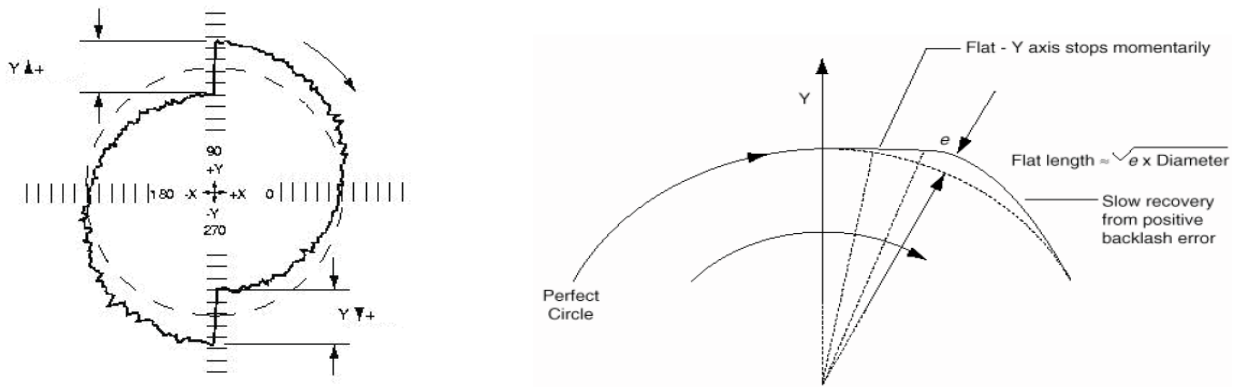
Rys. 6. Przebieg zmian średnich wartości odchyłek prostokątności i okrągłości w płaszczyźnie X-Y dla czterech grup testów

Fig. 6. The dispersion of average values of squareness and circularity error for few group of tests in X-Y plane



Rys. 7. Przebieg zmian wartości średniej luzu zwrotnego dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y

Fig. 7. Dispersion of backlash measurement for four group of test in X-Y plane

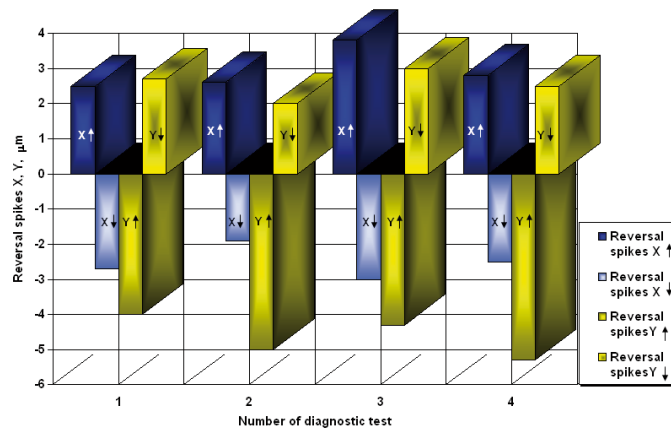


Rys. 8. Wpływ dodatniego luzu zwrotnego na realizowaną trajektorię ruchu [18, 24]: a) geometryczna reprezentacja błędu, b) zniekształcenie trajektorii ruchu

Fig. 8. The effect of positive backlash on a machine [18, 24]: a) geometrical representation of error, b) distortion of perfect path movement

skok odchyłki na wykresie kołowym testu diagnostycznego, przedstawionego przykładowo na rys. 10 a. Zasadniczym powodem powstawania błędu nawrotu jest zbyt wolna odpowiedź serwonapędu na sygnał z układu sterowania w chwili zmiany kierunku ruchu (przejście przez oś w interpolacji kołowej). Duże opóźnienie ruchu spowodowane zbyt małym położeniowym współczynnikiem wzmocnienia k_v , powoduje zmianę trajektorii ruchu w stosunku do zadanego toru.

Innymi przyczynami powstawania błędu nawrotu jest luz w układzie napędowym (luz na śrubie toczonej lub przekładni zębatej) oraz niewłaściwa praca serwonapędów. Cechą charakterystyczną błędu nawrotu jest to, że po pewnym

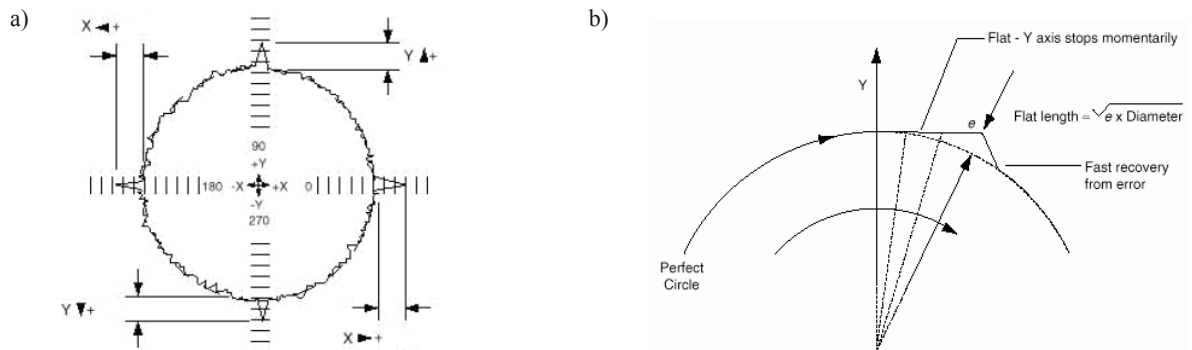


Rys. 9. Przebieg zmian wartości średnich błędów nawrotu dla czterech grup testów w płaszczyźnie X-Y

Fig. 9. Dispersion of reversal spikes measurement for four group of test in X-Y plane

Obtained results show high repeatability of measurement of reversal spikes in particular CNC machine tools. The effect of a reversal spike is that a circular interpolated cutter path will show a small flat followed by an inward recovery step. Fig. 10 a illustrates how the Y axis approaches a perfect circle but then diverges because the axis has stopped. The basic reason for the occurrence of reversal spikes error is a slow response of servo mechanism to the signal of steering control system, in the moment of reverse of movement during circle

interpolation. Severe delay of movement, caused by a small positional support index, it causes the change of trajectory of movement as related to the path. Other reason for reversal spi-



Rys. 10. Wpływ błędów nawrotu na realizowaną trajektorię ruchu [18, 24]: a) geometryczna prezentacja błędów w teście kołowości, b) wpływy na idealny okrąg

Fig. 10. The effect of a reversal spikes to the circularity plot [18, 24]: a) influence into circularity plot, b) influences to the perfect circle

czasie od momentu przejścia położenia zadanego osi X przez oś Y, silnik osi Y wykona ruch i serwonapęd zlikwiduje błąd w tej osi (rys. 10 a i b). Zasadniczym przedsięwzięciem zmierzającym do minimalizacji błędów nawrotu jest wykasowanie luzów w układzie napędowym i pomiarowym. Trwały efekt minimalizacji błędów nawrotu przyniesie odpowiednie nastawienie współczynników wzmocnienia regulatora położenia. W niektórych układach sterowania maszyn CNC istnieje także możliwość kompensowania błędów nawrotu.

W drugiej części badań diagnostycznych dokonano oceny wpływu prędkości ruchu posuwowego v_f na wartości odchyłek i rejestrowanych błędów. W tab. 2 przedstawiono analizowane średnie wartości odchyłek i błędów obrabiarki CNC zarejestrowane dla trzech różnych prędkości ruchu posuwowego frezarki w płaszczyźnie X-Y. Z tab. 2 wynika, że wartość średnia odchyłki okrągłości badanej obrabiarki wynosi $22,3\mu\text{m}$, a zakres zmian odchyłki obejmuje bardzo wąski przedział $1\mu\text{m} < 21,9\mu\text{m}; 22,9\mu\text{m} >$.

Na podstawie prezentowanych wyników badań diagnostycznych należy stwierdzić, że istotny wpływ na wartość całkowitej odchyłki okrągłości ma błąd nawrotu. Świadczą o tym zamieszczone w tab. 2 średnie udziały procentowe tego błędu w całkowitej odchyłce okrągłości ($11\div 18\%$). Powyższe wyniki świadczą również o tym, że błąd nawrotu w największym stopniu jest uzależniony od wartości prędkości ruchu posuwowego stołu frezarki v_f . Wyniki badań wpływu prędkości ruchu posuwowego stołu frezarki v_f podczas realizacji testu diagnostycznego przedstawiono w postaci graficznej na rys. 11.

Przedstawione na rys. 11 charakterystyki wskazują na liniowy charakter zmian błędów nawrotu w funkcji prędkości ruchu posuwowego v_f . Z rys. 11 wynika również, że wartość błędów nawrotu w osi Y rośnie w kierunku ujemnym wraz ze wzrostem prędkości ruchu posuwowego (t.j. podczas przechodzenia osi Y pod osią X, na wykresie kołowości pojawia się pik w kierunku dośrodkowym Y okręgu) oraz rośnie w kierunku dodatnim podczas przechodzenia osi Y nad osią X (na wykresie kołowości pojawia się pik na zewnątrz okręgu wzdłuż osi Y). Maksymalne wartości błędów nawrotu ($-6,6\mu\text{m}$, $3,2\mu\text{m}$) zaobserwowano dla prędkości ruchu posuwowego $v_f = 3000\text{ mm/min}$.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych skłaniają autorów do określenia w przyszłości związków funkcyjnych zależności zaobserwowane wartości błędów i odchyłek testowanych obrabiarek od sterowalnych parametrów realizacji testów diagnostycznych. Wymaga to jednak zbudowania bogatej bazy danych dotyczących określonej grupy obrabiarek CNC oraz opra-

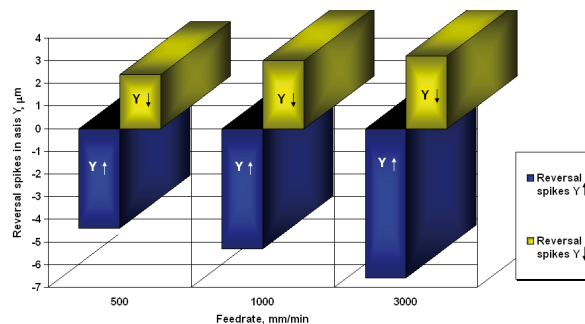
kes error is clearance in servomechanisms or transmission and improper work of servo mechanisms. The characteristic feature of reversal spikes error is that after some time from the moment of initial level of axis X through axis Y the engine of axis Y will make a movement and than servo mechanism will delete the error in the axis (fig. 10 a and 10 b). The basic task, that leads to minimize of the reversal spikes error is the cancellation of clearance in the servo mechanism of the CNC machine tool. The constant effect of minimize of reversal spikes error may be achieved by proper set of positional support index of the positioning regulator. Plot scaling changes the flat, which is actually machined, into a spike on the diagnostic plot as the machine appears to go beyond the perfect circle. If e is the height of the spike on the Ballbar plot then the length of the flat on the cut part can be calculated as the square root of e multiplied by the diameter of the cut made.

The next step in research was to evaluate the machine feedrate into circularity as well as other errors. Feedrate changed from 500 to 3000 mm/min but accuracy of machine defined by circularity was between <21.9 and $22.9\mu\text{m}>$

Table 2 presents average values of machine errors for different feed-rate of machine tool.

Described results show that the most affected type of error by the measuring speed was reversal spikes. An attempt to identify the influence of machine feed-rate on the machine at which the reversal spikes are minimised by performing a number of tests at various machine feed-rates. Use the best feed-rate identified for finishing cuts during circular interpolation.

It is confirmed by the shown in table 2 percentage participation of the error in the complete circularity error ($11\div 18\%$). The abovementioned results show that the reversal spikes error depends mostly on the feed-rate value of the plane. Results of measurement of feed-rate of machine plane during test are presented on fig. 11. The results presented in fig. 11 show that the reversal spikes error value in axis Y minimizes altogether with feed rate growth (during the movement of axis Y under axis X – on the circularity figure appears the peak inwards axis Y of the circle) and grows in the movement of axis Y above axis X (on the circularity figure appears the peak outwards axis Y of the circle). Maximum values of the error ($-6,6\mu\text{m}\div 3,2\mu\text{m}$) were observed for the feed rate v_f equal 3000mm/min. The achieved results of the experimental research show that the authors may measure the functional relations of dependencies of errors and tested CNC machines and steering parameters of diagnostic tests. It requires the construction of a complex database of



Rys. 11. Przebieg zmian błędów nawrotu w funkcji prędkości ruchu posuwowego v_f

Fig. 11. Reversal spikes errors vs. machine speed of feed-rate

cowanie modelu pozwalającego na optymalizację warunków realizacji testów diagnostycznych. W efekcie przyczyni się to do zmniejszenia stopnia niepewności pomiarów mających na celu ocenę stanu geometrycznego obrabiarek CNC. Przedstawione w pracy wyniki stanowią również fragment szeregu czasowego, który w przyszłości będzie stanowił podstawę realizacji zadania prognostycznego, pozwalającego przewidywać stan geometryczny obrabiarki na podstawie „stanów przeszłych”.

4. Podsumowanie i wnioski

Badania diagnostyczne eksploatowanych obrabiarek CNC z wykorzystaniem QC10 ballbar zmierzają do poprawy stanu technicznego obrabiarki poprzez usystematyzowaną i ukierunkowaną obsługę techniczną. W konsekwencji pozwalają na minimalizację odchyłek wynikających z pogarszającego się stanu technicznego obrabiarki. Zasadniczą wadą testu QC10 jest możliwość jego realizacji jedynie w trakcie przerw w pracy produkcyjnej maszyny. Wyłączenie obrabiarki z procesu produkcyjnego i badanie w całej przestrzeni obróbkowej są niewątpliwie głównymi wadami testu QC10. Nie mniej jednak łatwość realizacji cyklu pomiarowego i automatyczna identyfikacja poszczególnych rodzajów błędów oraz stosunkowo łatwa interpretacja wyników testu kołowości to niewątpliwie ważne zalety systemu QC10 ballbar. Wykonując 10-minutowe testy na każdej obrabiarkie CNC np. co 3 miesiące możliwe jest określenie, które obrabiarki dokonują interpolacji z błędami większymi niż 25 mikrometrów. W przypadku błędów przekraczających tę wartość, obrabiarka nie jest w stanie utrzymać określonych tolerancji obróbki części i w związku z tym prawdopodobne jest wystąpienie braków. Oznacza to, że maszyna wymaga konserwacji.

W oparciu o przeprowadzone badania i analizę wyników pomiarów diagnostycznych testowanej obrabiarki nie można stwierdzić jednoznacznie, że obrabiarka spełnia stawiane jej wymagania. Wynika to z ograniczonej liczby wykonanych pomiarów diagnostycznych. W przypadku realizacji testów lokalnych tylko niewielki zakres osi w przestrzeni obróbkowej został przebadany, co utrudnia całościową i kompleksową ocenę błędów obrabiarki. Można jedynie przypuszczać, że obrabiarka nie przekroczy dopuszczalnych wartości odchyłek. Przypuszczenie to zostanie potwierdzone po zbadaniu pełnych zakresów przemieszczeń wzdłuż poszczególnych osi sterowanych numerycznie i wyznaczeniu całkowitych błędów w poszczególnych płaszczyznach X-Y, Y-Z, X-Z. Z punktu widzenia jakości oceny diagnostycznej badanej maszyny autorzy zamierzają przeprowadzić gruntowną analizę dokładności badanej maszyny realizując szersze badania diagnostyczne w całej przestrzeni obróbkowej. Będą one obejmować pomiary w różnych miejscach tej przestrzeni przy kilku wartościach prędkości ruchu posuwowego dla każdego miejsca stosując różne wartości promienia interpolowanego okręgu. Autorzy podejmą również próbę weryfikacji uzyskanych wyników innymi metodami diagnostycznymi.

5. References

1. Bryan J.B. A simple method for testing measuring machines and machine tools; Part 1: Precision Engineering 1982; 4, 2: 61.
2. Bryan J.B. A simple method for testing measuring machines and machine tools; Part 2: Precision Engineering 1982; 4, 3: 125.
3. Caban J., Iskra R., Józwick J., Kamińska-Krzowska B. Ocena stanu maszyny technologicznej CNC z zastosowaniem interferometrii

a group of CNC machine tools and construction of a model which allows for optimization of conditions of diagnostic tests' completion. In effect, it will help to lessen the level of uncertainty of measurement which is aimed at the check of CNC machines geometrical state. The abovementioned effects, presented in the paper are also a fragment of temporal series, which in future may be a basis of the prognosis task allowing for prognostics of geometrical state of CNC machine on the information about past state.

4. Conclusions

Diagnostic results of machine using QC10 ballbar method lead to improvement of technical state of the machine, through systematized and directed technical service. In conclusion, deviations resulting from the impairment of machine technical control are minimized. The possibility of the QC10 test completion only at the time of machine outage in the production phase is a substantial drawback of the test. Exclusion of the machine from the production process and research identification in processing are main disadvantages of the QC10 test. But it is easy to conduct the measurement cycle and to identify the particular error types as well as it is relatively easy to interpret the circular test, which is undoubtedly the main asset of the QC10 ballbar test. Performance of 10 minutes test on each machine e.g. each 3 months enables determination of the machine which interpolates with errors of a value higher than 25 micrometers. In case of higher value errors, the machine tool will not keep the determined part processing tolerance; as a result deficiencies may occur. This indicates that the machine requires maintenance. On the basis of the research and analysis of diagnostic measurements of the machine, one may not unequivocally state that the machine completes requirements imposed. It results from the number of diagnostic measurements conducted.

In case of local tests completion, only a small axis scope of machining space was researched, which hinders the complete assessment of machine errors. One can assume that the machine will not exceed the permissible deviation values. The supposition will be confirmed only after the research of complete scope of shifts along certain CNC axis is completed and after determination of total errors of certain X-Y, Y-Z, X-Z surfaces. Detailed analysis of the machine will be conducted by the authors from the perspective of diagnostic evaluation, by performance of a broad diagnostic research of full machining space. It will include measurement in different locations, using different values of interpolated circle radius. The authors will also verify results, using other diagnostic methods.

- laserowej. Monografia pod red. J. Jóźwik i inni „Techniki wytwarzania w budowie maszyn – aktualne zagadnienia badawcze”. Lublin: LTN, 2007.
4. Curran E., Phelan P. Quick check error verification of coordinate measuring machines; *Journal of Materials Processing Technology* 2004;155-156: 1207-1213.
 5. Honeczarenko J., Kwaśniewicz J. Nowe systemy pomiarowe do sprawdzania dokładności obrabiarek CNC. *Mechanik* 2008;12: 1012-1016.
 6. Iwasawa K., Iwama A., Mitsui K. Development of a measuring method for several types of programmed tool paths for NC machine tools using a laser displacement interferometer and a rotary encoder, *Precision Engineering* 2004; 28, 4: 399–408.
 7. Jóźwik, J., i inni. Prognozowanie dokładności obrabiarki CNC na podstawie szeregu czasowego. Cz. 1. Wybrane urządzenia diagnostyczne obrabiarek CNC. Published by Scientific and Technical Society at the University of Zilina. Slovakia, 2009.
 8. Jóźwik, J., i inni. Prognozowanie dokładności obrabiarki CNC na podstawie szeregu czasowego. Cz. 2. Prognozowanie odchyłki okrągłości i prostopadłości osi obrabiarki CNC. Published by Scientific and Technical Society at the University of Zilina. Slovakia, 2009.
 9. Kakino Y., Ihara Y., Shinohara A. Accuracy Inspection of NC Machine Tools by Double Ball Bar Method, Hasanser Verlag Publishers, 1993.
 10. Král J. et al. Obmedzujúce limity dnešných CNC obrábacích centier. *Acta Mechanica Slovaca* 2008; 12, 3: 219-222.
 11. Král J. et al. Verifikácia presnosti NC a CNC trojosej frézy. In: *Acta Mechanica Slovaca* 2008; 12, 3: 229-232.
 12. Lei W.T., Sung M.P., Liu W.L., Chuang Y.C. Double ballbar test for the rotary axes of five-axis CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2007; 47, 2: 273-285.
 13. Nakazawa H., Ito K. Measurement system of contouring accuracy on NC Machine Tools. *Bull. Japan Soc. Prec. Eng.* 1978; 12, 4: 189.
 14. PN-ISO 230-4:1999 – Przepisy badania obrabiarek. Badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie.
 15. Rzyśko T. Nowe systemy pomiarowe do stosowania na tokarkach CNC. *Mechanik* 2001; 10 (74): 665.
 16. Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitte R., Delbressine F. Geometric error measurement and compensation of machines—An update. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2008; 57, 2: 660-675.
 17. Szafarczyk M. Urządzenie do sprawdzania dokładności obrabiarek 5-osiowych. *Mechanik* 2005; 4 (79), 268.
 18. Ślęzak Ł., Magdziak M. Nowoczesne systemy pomiaru przedmiotów na obrabiarkach NC. *Mechanik* 2007; 5-6 (81): 483 ÷ 489.
 19. Uhlmann E., Hohwieler E., Geisert C.. Monitoring of Slowly Progressing Deterioration of CNC-Machine Axes. 2nd I²PROMS Virtual International Conference 3–14 July 2006 Intelligent Production Machines and Systems. Copyright © 2006 Elsevier Ltd., 2006.
 20. Weikert S. R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, *CIRP Annals* 2004; 53, 1: 429 .
 21. Wypysiński R. Wektorowa metoda sprawdzania maszyn NC na przykładzie tokarek. XI Konferencja Naukowo-Techniczna Automation 2007. Warszawa: Pomiary Automatyka Robotyka 2007.
 22. Wypysiński R. Zastosowanie niezależnego układu współrzędnych do badania dokładności maszyn NC. XII Konferencja Naukowo-Techniczna Automation 2008. Warszawa: Pomiary Automatyka Robotyka 2008.
 23. Wypysiński R.: Vector Bar for accuracy testing of NC lathes, IV International Conference on Machining and Measurement of Sculptured Surfaces, No A/2/MMSS06.
 24. Qiu H., Nishitani H., Kubo A., Yamamoto J., Hirakawa I. Examinations on Motion Accuracy Evaluation Based on the Ball Bar Test for a Machining Center; *Bulletin of the Faculty of Engineering Kyushu Sangyo University* 2003; 40:11-18.

Dr inż. Jerzy JÓZWIK

Mgr inż. Paweł PIEŚKO

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji

Politechnika Lubelska

Ul. Nadbystrzycka 36, 20-816 Lublin

e-mail: j.jozwik@pollub.pl; p.piesko@pollub.pl

Mgr inż. Grzegorz KRAJEWSKI

Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej

Politechnika Warszawska

Ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

e-mail: gkrajewski@gazeta.pl
