

# Porównanie błędów pionowych centrów frezarskich o różnym okresie eksploatacji

## Comparison of vertical milling centers geometric errors with different time of machining

TOMASZ JANKOWSKI  
WOJCIECH BORKOWSKI  
PAWEŁ PIÓRKOWSKI  
ANDRZEJ ROSZKOWSKI  
WACŁAW SKOCZYŃSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.102>

Prezentowane wyniki testów diagnostycznych trzech trzyosiowych pionowych centrów frezarskich po różnym okresie eksploatacji w warunkach przemysłowych. Przeanalizowano błędy obróbkowe. Dokonano oceny obrabiarek na podstawie wartości błędów oraz określono przydatność maszyn do realizacji zadań obróbkowych w przedsiębiorstwie.

**SŁOWA KLUCZOWE:** pionowe centrum frezarskie, badania dokładności geometrycznej, QC10 Ballbar, odchyłka okrągłości, diagnostyka maszyn

*Presented are the results of diagnostic tests for three 3-axis vertical milling centers with different time of machining. An error analysis was carried out. Machine tool evaluation was made on the basis of error values and their suitability for carrying out machining tasks was determined.*

**KEYWORDS:** milling machine center, geometrical checks, QC10 Ballbar, roundness deviation, machine diagnostics

Nowoczesne systemy wytwarzania, wykorzystujące automatyzację, robotyzację i komputeryzację procesów technologicznych, w połączeniu z nowoczesnymi formami organizacji produkcji, pozwalają osiągnąć wysoką wydajność, elastyczność, jakość oraz efektywność ekonomiczną produkcji. Taki efekt można uzyskać pod warunkiem utrzymania prawidłowego stanu technicznego maszyn i urządzeń poprzez zapobieganie procesom zużycia ich elementów i minimalizowanie tego zużycia oraz przyjęcie właściwej strategii działań związanych z utrzymaniem ruchu eksploatowanej grupy urządzeń. Źródłem informacji o stanie maszyn i urządzeń jest diagnostyka techniczna [10].

Diagnostyka obrabiarek stanowi podstawę ich niezawodnego i dokładnego działania. Zapotrzebowanie na nią rośnie wraz z globalizacją wytwarzania, coraz silniejszą konkurencyjnością i wymaganą wysoką elastycznością produkcji. Ważnym elementem tego trendu jest dążenie do zwiększenia dokładności obróbki. To z kolei powoduje podnoszenie wymagań względem możliwości obrabiarek [1, 3].

Rodzaje diagnozowania można wyróżniać według wielu kryteriów oraz funkcji systemów obróbkowych, stopnia

organizacji i czasu występowania [2]. Diagnozowanie do-razno-okresowe (diagnostyka eksploatacyjna) jest podstawową formą kontroli maszyn na etapie ich eksploatacji. Diagnostyka okresowa ma trzy główne zadania [10]:

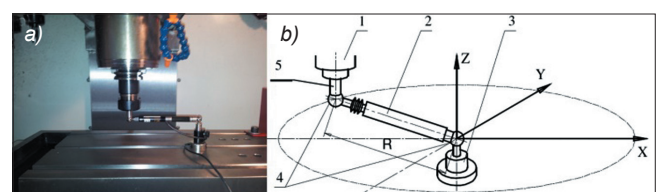
- dostarcza dokładnych informacji o stanie maszyny w czasie przewidzianym na przegląd okresowy, pozwala ustalić zakres czynności niezbędnych do przywrócenia jej pełnej sprawności i dokładności,
- umożliwia prognozowanie dalszych działań diagnostycznych i naprawczych,
- umożliwia określenie sposobu modernizacji diagnozowanych obiektów oraz metod diagnozowania.

W niniejszej pracy zostaną przedstawione wyniki testów diagnostycznych trzech trzyosiowych frezarek CNC po różnym czasie eksploatacji w warunkach przedsiębiorstwa produkcyjnego. Testy diagnostyczne wykonano z wykorzystaniem systemu Ballbar QC10.

Celem opisanych działań, poza weryfikacją stanu technicznego obrabiarek po różnym okresie eksploatacji, jest wykorzystanie tej wiedzy do planowania i rozdzielania zadań produkcyjnych o zróżnicowanych wymaganiach dokładności wymiarowo-kształtowej wykonywanych wyrobów.

### System pomiarowy

Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano system Ballbar QC10 firmy Renishaw – jedno z najbardziej popularnych w przemyśle rozwiązań do oceny błędów maszyn [4, 9]. Głównym elementem tego systemu jest precyzyjny przetwornik pomiarowy (kinematyczny pręt kulowy), umożliwiający dokładny pomiar z dużą rozdzielczością promienia okręgu podczas wykonywania ruchu po okręgu (rys. 1), pozwalający na wyznaczenie odchyłki okrągłości w interpolowanym ruchu kołowym, zgodnie z normą regulującą badania obrabiarek PN-ISO 230-4 [5, 6, 8].



Rys. 1. System diagnostyczny Ballbar QC10 firmy Renishaw: a) urządzenie zainstalowane na stole frezarki, b) zasada prowadzenia testu [4]: 1 – wrzeciono frezarki, 2 – przetwornik pomiarowy, 3 – magnetyczna podstawa centrująca, 4 – końcówki kuliste, 5 – uchwyt magnetyczny

\* Dr inż. Tomasz Jankowski (tomasz.jankowski@pwr.edu.pl), mgr inż. Wojciech Borkowski (wojciech.borkowski@pwr.edu.pl), mgr inż. Paweł Piórkowski (pawel.piorkowski@pwr.edu.pl), dr inż. Andrzej Roszkowski (andrzej.roszkowski@pwr.edu.pl), dr hab. inż. Wacław Skoczyński prof. PWr (waclaw.skoczyński@pwr.edu.pl) – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej

Do przeprowadzenia tego testu konieczne jest wykonanie przez maszynę ruchu z interpolacją kołową w płaszczyźnie XY o kąt  $720^\circ$  w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, a następnie takiego samego ruchu w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Ruch w obu kierunkach podzielony jest na trzy fazy. Pierwsze  $180^\circ$  stanowi fazę rozbiegu, kolejne  $360^\circ$  – fazę pomiaru zasadniczego ze stałą prędkością posuwu, a ostatnie  $180^\circ$  to faza wybiegu.

Podobne testy można wykonać w płaszczyznach XZ i YZ, ale na łuku o kącie ograniczonym do maksymalnie  $220^\circ$ , co wynika z budowy pionowej frezarki trzosiowej.

Za pomocą oprogramowania firmy Renishaw, poza wspomnianą już odchyłką okrągłości, istnieje możliwość określenia innych błędów składowych: błędów geometrycznych, błędów dynamicznych i luzów.

### Plan eksperymentu

Głównym celem przeprowadzanych badań jest identyfikacja i ilościowa ocena błędów dokładności grupy obrabiarek CNC eksploatowanych w przedsiębiorstwie produkcyjnym przemysłu maszynowego. Informacja o wartościach zmierzonych błędów będzie mogła być wykorzystywana do doboru odpowiednich zadań obróbkowych, które będą wykonywane na badanych maszynach podczas ich dalszej eksploatacji. Podjęta zostanie również próba powiązania zmierzonych błędów z czasem pracy obrabiarek oraz rodzajem obróbki skrawaniem, który był na nich najczęściej wykonywany.

Do badań wybrano trzy trzyosiowe pionowe centra frezarskie firmy Haas: VF-7/50, VF-6/50 i VF-3YT/50, o analogicznej strukturze kinematycznej oraz wrzecionach o takiej samej budowie i charakterystyce (rys. 2). Podstawowe dane techniczne obrabiarek przedstawiono w tabelicy.

Frezarka VF-7/50 była używana głównie do obróbki kształtująco-wykończeniowej, a podczas jej pracy obciążenie wrzeciona zawierało się w granicach  $30 \pm 50\%$  dopuszczalnych wartości maksymalnych.

Głównym zadaniem frezarki VF-6/50 było wykonywanie obróbki zgrubnej. Obciążenie wrzeciona podczas tego rodzaju obróbki wahało się w przedziale  $70 \pm 90\%$ .

Frezarka VF-3YT/50 była eksploatowana jedynie przez dwa miesiące, a używano jej głównie w celach szkoleniowych, do wykonywania krótkich serii przedmiotów. Obciążenie wrzeciona podczas jej pracy nie przekraczało  $40\%$  dopuszczalnych wartości.



Rys. 2. Badane centra frezarskie: a) VF-7/50, b) VF-6/50, c) VF-3YT/50

Zdecydowano o przeprowadzeniu pomiarów w punkcie centralnym stołu każdej z maszyn. Ten fragment przestrzeni roboczej obrabiarki jest najczęściej wykorzystywany do mocowania przedmiotu obrabianego, ponadto wybór centralnego punktu stołu pozwala na wykorzystanie prętów kulowych o kilku różnych długościach.

Do wykonania testów wykorzystano pręt kulowy o trzech długościach ( $L$ ): 100, 150 i 300 mm – czyli wszystkich, przy których jest możliwe wykonanie pełnego okręgu w przestrzeni roboczej obrabiarek.

Ustalono, że pomiary zostaną wykonane dla następujących wartości prędkości posuwu liniowego ( $V_f$ ): 1000, 3000, 6000 mm/min.

Taki dobór długości pręta kulowego oraz wartości prędkości posuwu wynika z tego, że od promienia okręgu kreślonego przez pręt kulowy oraz prędkości, z jaką ten ruch jest wykonywany, zależy udział procentowy poszczególnych rodzajów błędów w całkowitym błędzie okrągłości. Podczas realizacji pomiaru z dużą prędkością o wartości odchyłki okrągłości decydują głównie błędy dynamiczne. W przypadku gdy pomiar odbywa się z małą prędkością, większy wpływ na wartość odchyłki okrągłości mają błędy geometrii maszyny.

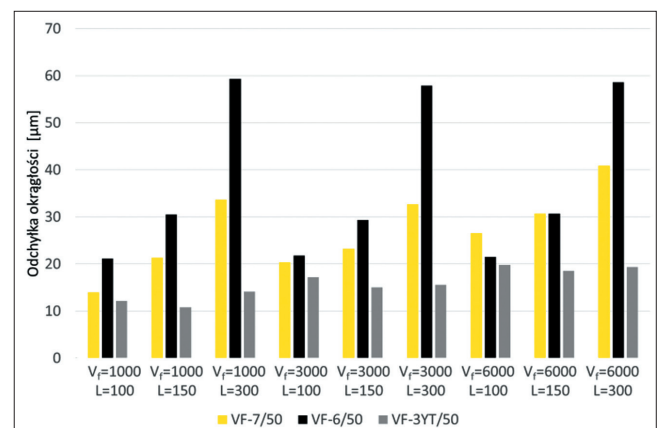
Zaplanowano zmierzenie za pomocą systemu diagnostycznego Ballbar QC10 następujących wielkości: odchyłki okrągłości, błędu nawrotu osi X, błędu nawrotu osi Y, odchyłki prostopadłości, różnicy odchyłki pozycjonowania, luzu zwrotnego osi X oraz luzu zwrotnego osi Y. Pomiary postanowiono przeprowadzić wyłącznie w płaszczyźnie XY.

TABLICA. Podstawowe dane techniczne badanych maszyn

Model frezarki	Maszyna 1	Maszyna 2	Maszyna 3
	VF-7/50	VF-6/50	VF-3YT/50
Moc wrzeciona, kW	22,4	22,4	22,4
Maks. prędkość wrzeciona, obr/min	7500	7500	7500
Rok produkcji	2010	2015	2017
Czas pracy, h	6302	2444	103

### Analiza wyników

Dla każdej z trzech badanych obrabiarek wyznaczono wartości odchyłki okrągłości przy dziewięciu kombinacjach parametrów: długości pręta kinematycznego i wartości prędkości posuwu (rys. 3). Wyniki pokazują znaczne różnice pomiędzy badanymi maszynami, co może wskazywać na zróżnicowanie stanu technicznego i stopnia zużycia zespołów i elementów maszyn.



Rys. 3. Wyniki pomiarów odchyłki okrągłości w funkcji długości pręta kinematycznego ( $L$ , mm) i prędkości posuwu liniowego ( $V_f$ , mm/min) dla trzech badanych maszyn

Odchyłki okrągłości dla maszyny VF-7/50 osiągają wartości od 13,9 do 40,9  $\mu\text{m}$ . Wartości te rosną wraz ze wzrostem długości pręta kulowego i prędkości posuwu. Odchyłki okrągłości dla maszyny VF-6/50 uzyskały wartości od 21,1 do 58,6  $\mu\text{m}$  i na tej maszynie błędy we wszystkich pomiarach osiągały najwyższe wartości. Odchyłki okrągłości dla maszyny VF-3YT/50 uzyskiwała wartości od 12,1 do 19,8  $\mu\text{m}$  i były to najniższe wartości błędów w porównaniu z analogicznymi pomiarami dla pozostałych maszyn.

Rezultaty pomiarów pokazują pewne zależności (rys. 3). Wartości odchyłki okrągłości dla maszyn 1 i 2 są bardzo wrażliwe na zmianę długości pręta kulowego. Wraz ze wzrostem tej długości rośnie wartość odchyłki sumarycznej. Taka zależność nie występuje dla maszyny 3. Inaczej jest w przypadku zależności od prędkości posuwu, która jest widoczna dla maszyn 1 i 3, natomiast nie widać jej dla maszyny 2.

W analizie błędów składowych skupiono się na najbardziej znaczących błędach, tzn. mających największy wpływ na wartości sumarycznej odchyłki okrągłości. Są to: błąd nawrotu, odchyłka prostopadłości, różnica odchyłki pozycjonowania i luz zwrotny.

W rezultatach pomiarów maszyny VF-7/50 zaobserwowano zależność polegającą na tym, że dla mniejszych długości pręta kulowego i wyższych prędkości posuwu dominują błędy dynamiczne, przede wszystkim błąd nawrotu w osi X (30%) i w osi Y (5%). Natomiast wraz ze zwiększaniem długości pręta kulowego i obniżaniem prędkości posuwu liniowego maleje wartość błędów dynamicznych, a rośnie wartość błędów geometrii, zwłaszcza odchyłki prostopadłości osi (14%) i różnicy odchyłki pozycjonowania (32%).

Wyniki pomiarów maszyny VF-6/50 pokazują bardzo duży wpływ odchyłki prostopadłości osi. Błąd ten stanowi dominującą składową całkowitej odchyłki okrągłości (41-63%) we wszystkich pomiarach, niezależnie od długości pręta kulowego i prędkości posuwu. W wynikach pomiarów uzyskanych dla maszyny VF-3YT/50 widoczny jest podobny trend wpływu błędów dynamicznych i błędów geometrii.

## Podsumowanie

Prowadzenie regularnych badań diagnostycznych pozwala na pozyskanie aktualnej wiedzy o stanie technicznym eksploatowanych maszyn. Wykorzystanie tych informacji w planowaniu zadań obróbkowych dla różnych obrabiarek umożliwia bardziej efektywne wykorzystanie wszystkich maszyn.

Na podstawie badań eksperymentalnych trzech centrów obróbkowych o różnym okresie eksploatacji i uzyskanych wartości błędów można stwierdzić znaczne różnice w stanie technicznym maszyn. Najmniejszy błąd całkowity okrągłości wykryto podczas pomiarów frezarki VF-3YT/50, natomiast największa wartość tego błędu wystąpiła podczas pomiarów frezarki VF-6/50. Obrabiarka ta, mimo że została wyprodukowana w 2015 r., przekracza dopuszczalną przez normę odchyłkę okrągłości wynoszącą 12  $\mu\text{m}$  oraz podawaną w literaturze dopuszczalną wartość odchyłki okrągłości, przy której możliwe jest zachowanie zadowalającej dokładności wymiarowo-kształtowej, wynoszącą 25  $\mu\text{m}$  [5,7]. Mimo że czas pracy frezarki VF-6/50 jest o ponad połowę krótszy od czasu pracy frezarki VF-7/50, to wartości błędów w obrabiarence o dłuższym czasie pracy były niższe. Można na tej podstawie sformułować wniosek, że rodzaj stosowanej obróbki oraz stopień obciążenia wrzeczona mają większy wpływ na pojawienie się błędów w obrabiarence niż czas pracy maszyny.

Frezarka VF-7/50 po ponad 6000 godzin pracy zachowuje zadowalające wartości zmierzonych błędów i wciąż jest możliwe wykonywanie na niej przedmiotów z zadowalającą dokładnością wymiarowo-kształtową. W porównaniu z frezarką VF-3YT/50 można jednak zaobserwować, że czas pracy obrabiarki wpływa na pogorszenie się jej dokładności, nawet jeżeli stosuje się niewielkie obciążenia wrzeczona.

Przeprowadzone badania pozwalają na przygotowanie planu dalszej eksploatacji omówionych maszyn pod kątem ich efektywnego wykorzystania w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

Z uwagi na największą wartość odchyłki okrągłości do zadań związanych z obróbką zgrubną powinna być używana frezarka VF-6/50. Warto zwrócić uwagę, że mimo znacznego przekroczenia dopuszczalnych wartości błędów, obrabiarka może być wciąż użyteczna w przedsiębiorstwie bez konieczności jej kalibracji. Do zadań związanych z obróbką kształtującą powinno się przeznaczyć frezarkę VF-7/50. Jej odchyłka okrągłości przekracza wartości dopuszczalne przez normę, ale w praktyce przemysłowej obrabiarki o takiej dokładności pozwalają na osiągnięcie zadowalającej dokładności wymiarowo-kształtowej. Frezarka VF-3YT/50, która w badaniu osiągnęła najmniejszą wartość odchyłki okrągłości, powinna być wykorzystywana do zadań związanych z obróbką wykończeniową. Z uwagi na fakt, że obróbka zgrubna powoduje najszybsze pogarszanie się dokładności obrabiarki, należy rozważyć unikanie stosowania tego rodzaju obróbki na nowych maszynach, o ile nie zostały zakupione przede wszystkim do tego celu.

Podczas badań udało się także potwierdzić zależność dotyczącą wpływu różnego rodzaju błędów na całkowitą odchyłkę okrągłości. W analizowanych maszynach błędy dynamiczne, głównie błędy nawrotu osi, miały decydujący wpływ na wartość błędu okrągłości podczas wykonywania pomiaru z wysoką wartością posuwu, wynoszącą 6000 mm/min. W przypadku pomiarów z niską wartością posuwu, wynoszącą 1000 mm/min, znacznie większy wpływ na całkowity błąd okrągłości miały błędy geometrii, głównie odchyłka pozycjonowania oraz odchyłka prostopadłości osi.

Przedstawione pomiary błędów okrągłości pozwalają w szybki sposób pozyskać wiedzę na temat niedokładności powodowanych przez wykonywane na danej maszynie zadania obróbkowe. Dane dotyczące tej niedokładności pozwalają użytkownikowi obrabiarki na uwzględnienie tej wiedzy podczas planowania działań związanych z doborem odpowiedniej obrabiarki do wykonania określonych operacji obróbki skrawaniem. Informacja ta jest przydatna, gdy w przedsiębiorstwie znajduje się kilka maszyn tego samego typu, które mogą być stosowane do wytwarzania takich samych przedmiotów.

## LITERATURA

1. Cempel C., Tomaszewski F. (red.). „*Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań*”. Radom: MCNEMT, 1992.
2. Honczarenko J. „*Elastyczna automatyzacja wytwarzania*”. Warszawa: WNT, 2000.
3. Honczarenko J., Kwaśniewicz J. „Nowe systemy pomiarowe do sprawdzania dokładności obrabiarek CNC”. *Mechanik*. 12 (2008): s. 1012–1016.
4. Józwick J. „Ocena odchyłki prostopadłości osi obrabiarki sterowanej numerycznie z wykorzystaniem systemu QC10 Ballbar”. *Postępy Nauki i Techniki*. 4 (2010): s. 91–102.
5. Józwick J., Pieško P., Krajewski G. „Ocena testu QC10 do kontroli off-line obrabiarek sterowanych numerycznie”. *Eksploatacja i Niezawodność*. 3 (2010): s. 10–20.
6. Kaczmarek J., Lange S., Świątek R., Żurawski A. „Identyfikacja błędów pionowego centrum frezarskiego za pomocą systemu Ball-bar oraz ich korekcja poprzez poziomowanie obrabiarki”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 479–487.
7. Materiały firmy Renishaw: Analiza przypadku – Systemy pomiarowe QC10 Ballbar i MT.
8. PN-ISO 230-4:1999 – Przepisy badania obrabiarek. Badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie.
9. Turek P., Kwaśny W., Jędrzejewski J. „Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek”. *Inżynieria Maszyn*. 15, 1/2 (2010): s. 7–37.
10. Żółtowski B., Cempel C. (red.). „*Inżynieria diagnostyki maszyn*”. Warszawa–Bydgoszcz–Radom: ITE PIB, 2004. ■