

Pomiary ruchów błędnych wrzecion obrabiarek

Spindle error movement measurement

KRZYSZTOF JEMIELNIAK
JAROSŁAW CHRZANOWSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.592

Pomiary ruchów błędnych wrzecion, pomimo iż znormalizowane [1,2], sporadycznie są stosowane jako jedno z dynamicznych badań określania stanu maszyny. Znacznie częściej wykonywane są badania statyczne lub przy niewielkich prędkościach nawet w przypadku wrzecion szybkoobrotowych. W Instytucie Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej, opracowano autorskie oprogramowanie Analizator Błędnych Ruchów Wrzecion Szybkoobrotowych. Zastosowane algorytmy pozwalają na automatyczny dobór parametrów pomiaru. Zgodnie z normami wartości pomiaru rzutowane są na kierunku wrażliwy. Generowane z programu wykresy biegunowe są znacznie czytelniejsze niż z programu komercyjnego. Oprogramowanie dostosowano do pomiarów z zastosowaniem niedokładnego wzorca. W niniejszym artykule opisano metodykę pomiaru, przeprowadzone badania wrzecion frezarskich oraz porównanie działania oprogramowania komercyjnego z autorskim.

SŁOWA KLUCZOWE: ruchy błędne wrzecion, diagnostyka maszyn, badania wrzecion

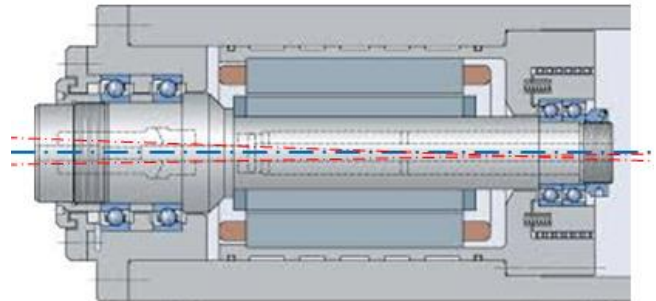
Spindle error movement measurement, although standardized [1, 2] (ISO 230-7 and B89.3.4) are occasionally used as one of the dynamic testing for determining the state of the machine. Static or at low speeds examinations, even in the case of high-speed spindles, are much more often performed. The Institute of Manufacturing Technology of Warsaw Technical University, developed proprietary software Hi-speed Spindle Error Analyzer. Applied algorithms allow for automatic selection of measurement parameters. According to the standards, measurement values are projected on the sensitive direction. Generated from the program polar graphs are much clearer than plots from the commercial program. Software was adapted to measurements using the inaccurate target. This paper describes the methodology of spindle errors movements measurement, researches of milling spindles and comparison with commercial software.

KEYWORDS: spindle error motion, machine tools diagnosis, axis of rotation metrology

Ruchy błędne wrzeciona – wyjaśnienie pojęcia

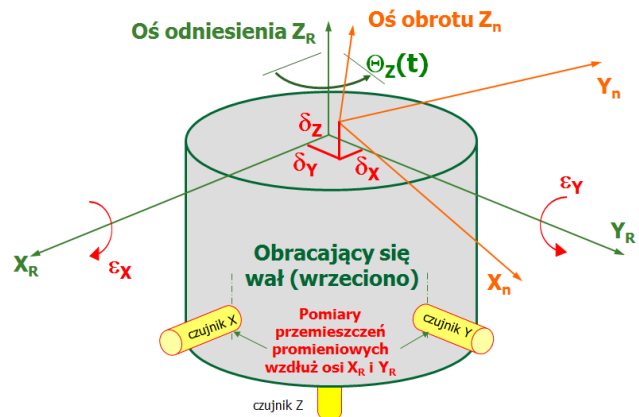
Pod pojęciem wrzeciona, rozumiemy obracającą się wokół jednej osi ułożyskowaną tuleję lub walec. Oś najczęściej kojarzy się inżynierowi z linią punktową, którą naniesiono na rysunku wykonawczym lub złożeniowym. Mało użytkowników wie, że takie wyobrażenie osi dotyczy wrzeciona idealnego, które w rzeczywistości nie istnieje. Realne wrzeciono to zespół współpracujących ze sobą powierzchni walcowych zewnętrznych i wewnętrznych, kulistych i innych, w zależności od jego konstrukcji, wykonanych w określonych klasach dokładności, tolerancji, odchyłek kształtu i położenia. Każda z współpracujących

powierzchni walcowych ma własną oś lecz osie te nie pokrywają się ze sobą, nie są nawet równoległe. Bytem istniejącym obiektywnie (nie tylko na rysunku) jest chwilowa oś obrotu wrzeciona zależna od powierzchni łożysk. W rzeczywistości, w trakcie obrotów wrzeciona chwilowa oś obrotu przemieszcza się, tworząc powierzchnię krzywoliniową owiniętą na walcu lub stożku, zmienną z obrotu na obrót. Na rysunku 1 kolorem niebieskim zaznaczono teoretyczną, konstrukcyjną oś obrotu, a kolorem czerwonym przykładowe położenia chwilowej osi obrotu.



Rys. 1. Przykład zespołu elektrowrzeciona z naniesioną osią konstrukcyjną oraz przykładowymi dwoma położeniami chwilowej osi obrotu

Wrzeciono, jako obracający się obiekt, powinno mieć jeden stopień swobody – obrót wokół osi głównej O_z . Niestety w rzeczywistości ma jeszcze niepożądane mikro-ruchy w kierunku osiowym i promieniowym, a także niepożądane mikro-obroty wokół osi prostopadłych do osi głównej. Te niepożądane ruchy nazywamy ruchami błędnymi wrzeciona. Przedstawiono je na rysunku 2. Po za obrotem O_z wszystkie pozostałe ruchy są niepożądane i nazywane ruchami błędnymi.

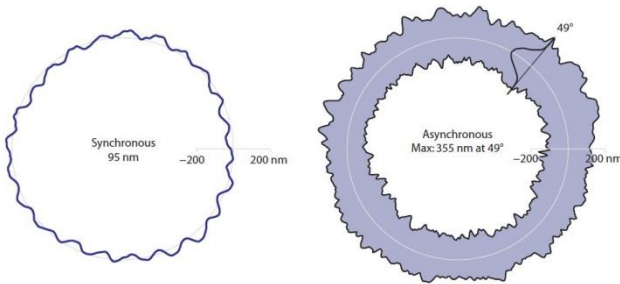


Rys. 2. Błędy ruchu obracającego się wału. X_R, Y_R, Z_R – nieruchomy układ odniesienia, X_n, Y_n, Z_n – układ związany z wrzecionem

Całkowity ruch błędny jest kombinacją wszystkich promieniowych, błędnych ruchów wrzeciona. Jego wartość to najgorszy możliwy przypadek, dający oszacowanie stanu wrzeciona obrabiarki.

* prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak (k.jemielniak@wip.pw.edu.pl)
dr inż. Jarosław Chrzanowski (j.chrzanowski@zaiois.pw.edu.pl)
Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji

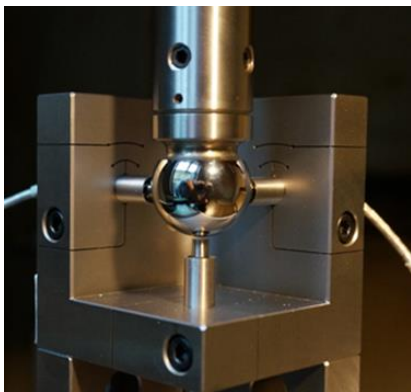
Na wartość całkowitego ruchu błędnego składają się ruchy błędne związane z położeniem kątowym wrzeciona (powtarzające się w każdym obrocie), zwane ruchami błędnymi synchronicznymi, oraz ruchy błędne asynchroniczne.



Rys. 3. Ruchy błędne synchroniczne i asynchroniczne [5]

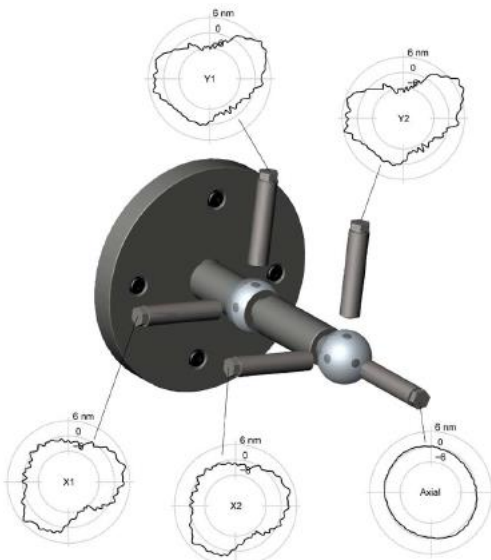
Ruchy błędne synchroniczne wyznaczone są jako wartość średnia położenia osi w danym położeniu kątowym. Wpływają one na kształt obrabianej powierzchni. Ruchy błędne asynchroniczne charakteryzują się "rozmyciem" na wykresach biegunowych (rys. 3) i wpływają głównie na jakość powierzchni.

W najprostszym przypadku ruchy błędne w kierunkach promieniowym i osiowym można zmierzyć trzema czujnikami przemieszczenia liniowego (rys. 2, 4).



Rys. 4. Zestaw z trzema czujnikami pojemnościowymi

W specjalnych przypadkach [3], gdy zależy nam na pomiarze błędnych obrotów wokół kierunków prostopadłych do osi głównej możemy np. użyć dwóch dodatkowych czujników rozmieszczonych w płaszczyźnie równoległej do XY (rys. 5).



Rys. 5. Badania precyzyjnego wrzeciona - zestaw z 5 czujnikami

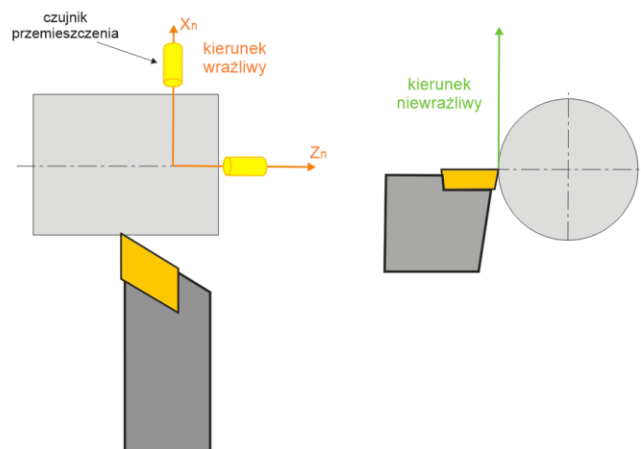
Stan wrzeciona obrabiarki skrawającej, w sposób istotny wpływa na przebieg procesu obróbki. Niepożądane ruchy, które wykonuje w rzeczywistości wrzeciono wpływają między innymi na jakość powierzchni, trwałość narzędzia, dokładność wymiarową przedmiotu. Dobrze znane są metody badania dokładności geometrycznej obrabiarek wykonywane statycznie lub z bardzo niskimi prędkościami obrotu (np. badanie bicia). Metody te pozwalają wykryć ewentualne błędy wykonania lub montażu. Należy pamiętać, że błędy mimosrodowości (bicie) nie są błędami ruchu a błędami geometrii – wynikają z niewspółosiowości powierzchni łożysk z powierzchnią, na której wykonuje się pomiar. W przypadku wrzecion istotny jest pomiar zmiany położenia osi obrotu w czasie prędkości obrotowych odpowiadających stosowanym w praktyce lub z górnego zakresu prędkości danego wrzeciona. Pomiar dynamiczny ruchów błędnych wrzecion są zalecane przez normy międzynarodową [1] oraz amerykańską [2]. Normy definiują podstawowe pojęcia związane z ruchami błędnymi, podają szereg zaleceń, lecz nie podają szczegółowej metodyki badań, a zwłaszcza metodyki akwizycji i analizy danych.

W Instytucie Techniki Wytwarzania Politechniki Warszawskiej, opracowano autorskie oprogramowanie dokonujące pomiarów w sposób automatyczny i prezentujące dane zgodnie z zaleceniami norm [1, 2].

Wykres biegunowy ruchów błędnych

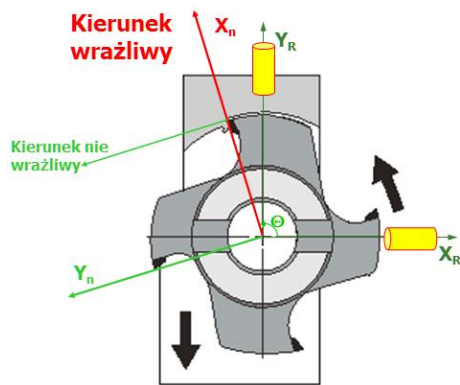
Wykres biegunowy ruchów błędnych jest zalecaną oraz przejrzystą formą prezentacji danych z pomiarów zebranych podczas badań. Pomiar wykonany w czasie szybkich obrotów wrzeciona (po kilkadziesiąt lub więcej pomiarów w czasie jednego obrotu) informują o błędnych ruchach wrzeciona w nieruchomym układzie odniesienia. Niezwykle istotne jest aby pomiary w kierunkach X_R i Y_R dotyczyły tego samego punktu na powierzchni obracającego się elementu wzorcowego. Wymaga to przemyślanej procedury pomiarowej a przede wszystkim dokładnego określenia prędkości obrotowej wrzeciona.

Z punktu widzenia dokładności obróbki istotne są przemieszczenia w tzw. kierunkach wrażliwych, to jest decydujących o kształtowaniu powierzchni obrabianej. Dla toczenia kierunek ten jest nieruchomy (tak jak narzędzie – rys. 6), prostopadły do powierzchni obrabianej (i do osi przedmiotu), przechodzący przez narzędzie. Dla frezowania kierunek wrażliwy jest również prostopadły do powierzchni obrabianej, jednak tym razem wiruje wraz z narzędziem (rys. 7).

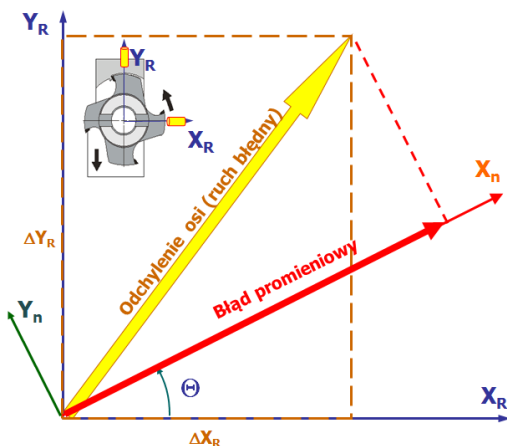


Rys. 6. Kierunki wrażliwe i niewrażliwe – toczenie

Sposób generowania z zebranych danych wykresu biegunowego z rzutowaniem na kierunki wrażliwe, na przykładzie frezowania przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 7. Obracający się kierunek wrażliwy – frezowanie



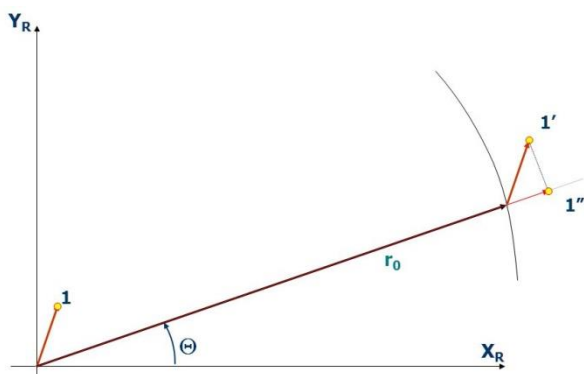
Rys. 8. Obliczanie błędów w kierunku promieniowym [4]

Wyniki pomiarów we współrzędnych X_R - Y_R muszą być zrzutowane na kierunek wrażliwy X_n i przedstawione w funkcji kąta obrotu jako błąd promieniowy wg wzoru:

$$r(\theta) = \Delta X_R(\theta) \cos(\theta) + \Delta Y_R(\theta) \sin(\theta) \quad (1)$$

Oba ruchy X_R i Y_R mogą być tak dodatnie jak ujemne, a otrzymany wykres byłby spletany i nieczytelny, stąd potrzebny jest biegunowy wykres błędów (Error Motion Polar Plot). Algorytm postępowania przy tworzeniu tego wykresu na przykładzie pojedynczego punktu pomiarowego przedstawiono na rys. 9.

Zmierzone dwoma czujnikami i obliczone wg wzoru 1 położenie punktu oznaczono na rys. 9 nr 1. Można to położenie przesunąć o dowolny promień r_0 , z uwzględnieniem aktualnego położenia kąowego wrzeciona θ . Na rys. 9 zaznaczono to położenie jako 1'.

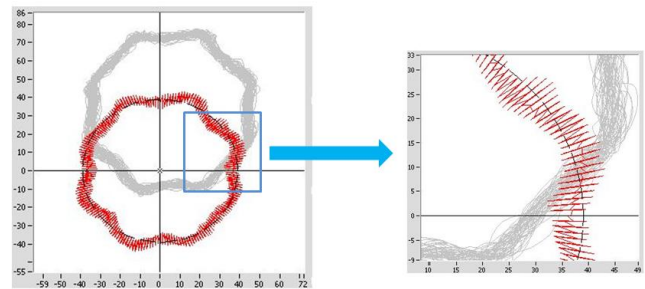


Rys. 9. Rysowanie wykresu biegunowego ruchów błędnych

Położenie punktu po zrzutowaniu na kierunek wrażliwy oznaczono jako 1". Równanie opisujące wartość ruchu błędnego promieniowego przyjmie postać 2.

$$r(\theta) = r_0 + \Delta X_R(\theta) \cos(\theta) + \Delta Y_R(\theta) \sin(\theta) \quad (2)$$

Wyniki pomiarów błędnych ruchów obracającego się wrzeciona są wyświetlane na wykresie biegunowym, pokazującym odchylenia osi obrotu wrzeciona w kolejnych położeniach kątowych, zrzutowane na kierunek wrażliwy (promieniowy) i analizowane podobnie jak wykres odchyłek okrągłości obrabianych części.



Rys. 10. Wykres biegunowy ruchów błędnych

Na wykresie X_R - Y_R (rys. 10) szarym kolorem w tle wykreślone są wyniki pomiarów z czujników X i Y w nieruchomym układzie współrzędnych. Wyznaczenie błędnych ruchów promieniowych oparte jest na promieniach kręgów określających idealny i rzeczywisty ruch obracającego się wrzeciona. Na wstępie, metodą najmniejszych kwadratów, wyznaczany jest okrąg średni (LSC-Least Squares Circle) reprezentujący nieruchomą oś obrotu wrzeciona, a jego środek wraz z wykresem przemieszcza się do środka układu współrzędnych. Jego promień wynika z mimośrodowości trzpienia pomiarowego względem osi obrotu, i nie ma związku z błędnymi ruchami. Mimośrodekowość ta, może być wprowadzana w celu umożliwienia określania chwilowego kąta obrotu wrzeciona θ . Promień LSC może być także zwiększany czy wręcz utworzony wirtualnie (matematycznie) w celu uczynienia wykresu bardziej czytelny. Otrzymany w ten sposób biegunowy wykres błędnych ruchów, na którym odchylenia promieniowe od położenia równowagi w wielu obrotach, uporządkowane względem kąta obrotu θ położenia osi wrzeciona są oznaczone promieniowymi kreskami na rys. 10. Wykres ten może być przedmiotem dalszej analizy, to jest wyznaczenia błędów całkowitych, synchronicznych (skorelowanych z obrotami) i asynchronicznych.

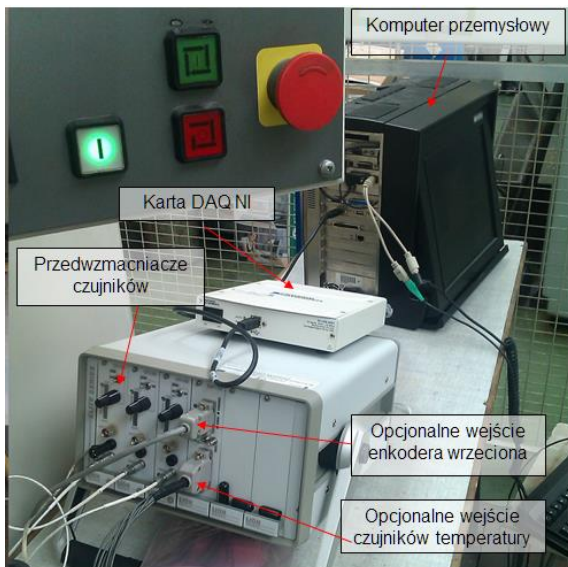
Zastosowane w oprogramowaniu autorskim algorytmy obliczeniowe oraz metodykę prowadzenia badań opisano w [6].

Badania wrzecion

W prowadzonych badaniach wykorzystano sprzęt pomiarowy z komercyjnego zestawu do analizy ruchów błędnych wrzecion oraz własne oprogramowanie ABRWS.

■ Sprzęt pomiarowy.

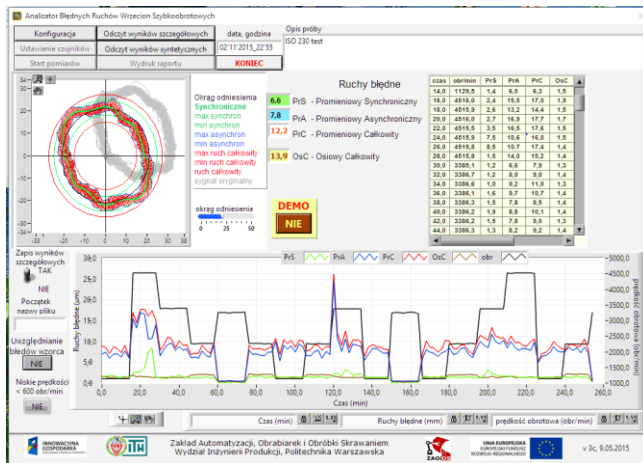
Sprzęt pomiarowy jest w konfiguracji przystosowanej do badań ruchów błędnych wrzecion centrów tokarskich i frezarskich przy maksymalnej prędkości obrotowej wrzeciona $30K \text{ min}^{-1}$. W skład zestawu wchodzi precyzyjny wzorzec kulisty (rys. 4) o błędach kształtu pomijalnie małych w stosunku do badanych ruchów błędnych, trzech czujników pojemnościowych, przedwzmacniacza, standardowej karty akwizycji danych, podstawy mocowania czujników. Wzorzec kulisty otoczony czujnikami przedstawiono na rys. 4. Pozostałe elementy zestawu podczas pomiarów pokazano na rys. 11.



Rys. 11. Zespoły toru pomiarowego

■ Oprogramowanie

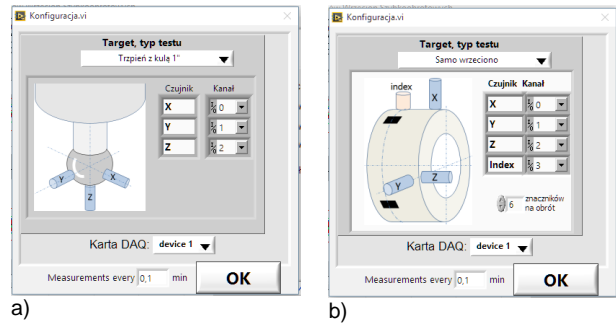
Program Analizator Błędnych Ruchów Wrzecion Szybkoobrotowych (ABRWS) jest autorskim oprogramowaniem rozwijanym od kilku lat. Na podstawie własnych doświadczeń, obsługa programu została maksymalnie uproszczona, a proces pomiarowy odbywa się automatycznie. Zdaniem autorów wystarczy kilkunasto-minutowe przeszkolenie do korzystania z programu. Interfejs tak zaprogramowano aby na pulpicie komputera wyświetlane były tylko istotne informacje. Wyniki obliczeń wykonywanych pomiarów na bieżąco wyświetlane są na ekranie i równoległe zapisywane są w pliku. Przykład ekranu startowego programu pokazano na rys. 12.



Rys. 12. Ekran startowy programu ABRWS

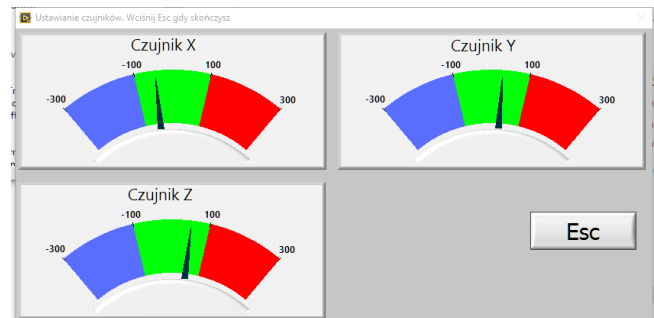
Niektóre z opcji można ukryć lub wyświetlić. W widoku na rys. 12 aktywne są np. opcje prowadzenia pomiarów z użyciem niedokładnego wzorca.

Programowanie zostało napisane w języku LabView i korzysta ze standardowych driverów kart pomiarowych. Nie jest istotne jaką kartą dysponujemy pod warunkiem, że dostarczono do niej drivery do LabView (większość dostępnych kart różnych producentów je ma) i zapewnione są wymagane parametry do badań. W opcji Konfiguracja wybierana jest rozpoznana karta pomiarowa, ustawiane kanały wejściowe dla czujników poszczególnych osi i opcjonalnie kanał dla czujnika indeksującego. Na rys. 13 przedstawiono okna menu Konfiguracja w opcji podstawowej (rys. 13a) i z czujnikiem indeksującym wykorzystywanym przy pomiarach bez dokładnego wzorca (rys. 13b)



Rys. 13. Ekran konfiguracji w opcji podstawowej a) i z czujnikiem indeksującym b)

Procedura ustawienia czujników względem kuli jest dość prosta i krótka. Polega na takim manipulowaniu ruchem osi obrabiarki aby wskazania wszystkich czujników znajdowały się w obrębie zielonego pola (rys. 14).



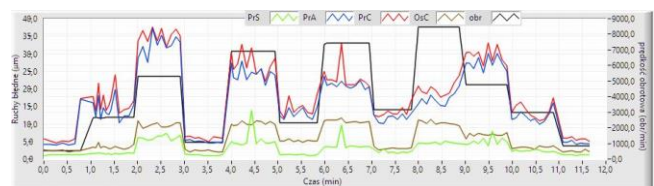
Rys. 14. Ekran pomocniczy ustawiania położenia czujników

Sprawnemu operatorowi powinno zająć to nie więcej niż 5 minut. Po tych ustawieniach program jest gotowy do przeprowadzenia pomiarów. Dobór parametrów karty DAQ odbywa się automatycznie w tle. Nie jest wymagana wiedza z zakresu metrologii i przetwarzania sygnałów. Program automatycznie rozpoznaje prędkość obrotową wrzeciona i dostosowuje częstotliwość próbkowania. Wyniki bieżącego badania wyświetlane są na ekranie pod głównym menu. Przykładowy wykres biegunowy, obliczone wartości poszczególnych ruchów błędnych oraz tabelę z wynikami cząstkowych obliczeń pokazano na rys. 15.



Rys. 15. Widok środkowej części ekranu podczas prowadzenia badań

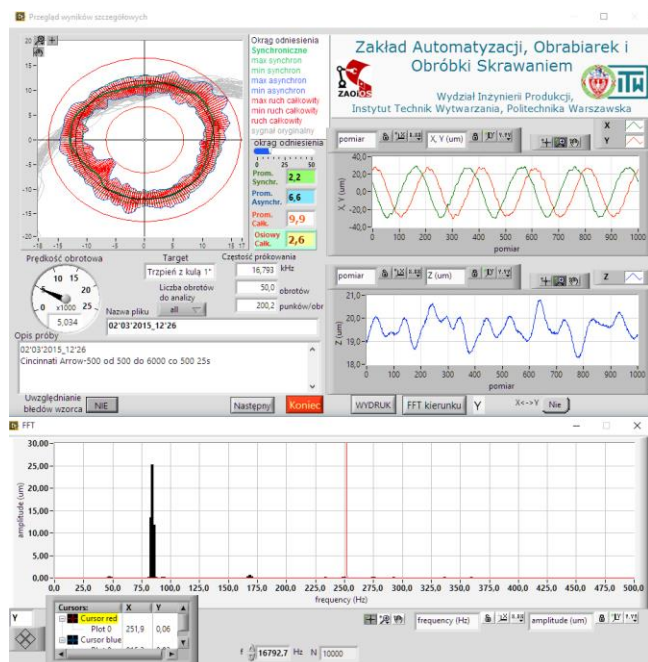
Natomiast w dolnej części ekranu graficznie przedstawiono wartości obliczonych poszczególnych ruchów błędnych na tle prędkości obrotowej wrzeciona (linia koloru czarnego na rys. 16).



Rys. 16. Rozkład wartości ruchów błędnych wrzeciona przy różnych prędkościach obrotowych wrzeciona

Z wykresu (rys. 16) tworzonego podczas prowadzenia pomiarów przy różnych prędkościach obrotowych wrzeciona można wywnioskować np. jakich prędkości unikać podczas obróbki, w jakim zakresie prędkości „zagęścić” pomiary.

Informacje o stanie wrzeciona i ewentualnych przyczynach problemów, można wnioskować na podstawie analizy wyników szczegółowych (rys. 17).

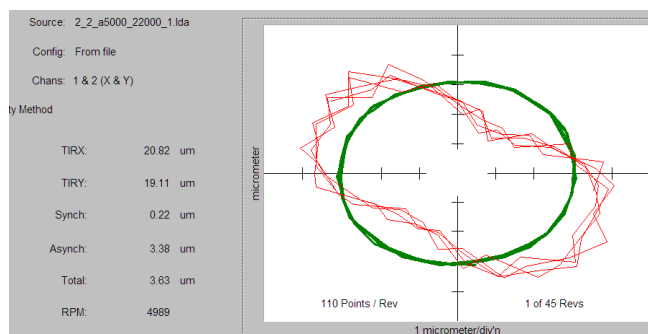


Rys. 17. Widok ekranu wyników szczegółowych dla określonej prędkości obrotowej wrzeciona. Dołączono również FFT kierunku osi Y

■ Testy i badania przemysłowe

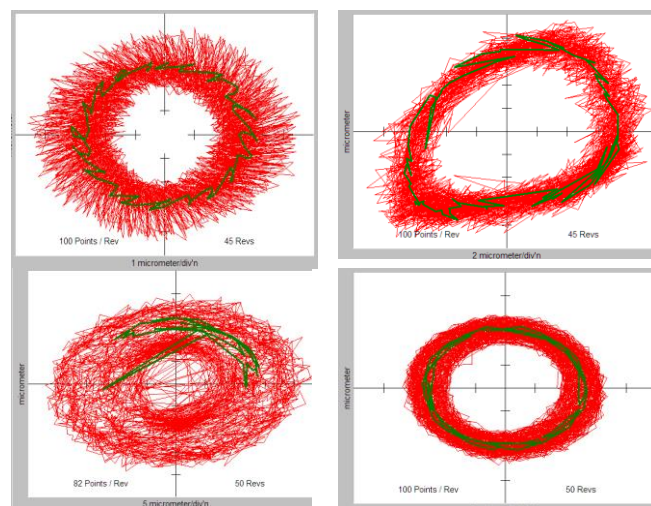
Testy programu i badania prowadzono na różnych obrabiarkach i w różnej konfiguracji sprzętowej. Zmieniano karty pomiarowe, korzystano z wyjść analogowych czujników, prowadzono badania na innych wzorcach niż kula oraz bez dokładnego wzorca [7]. Większość przeprowadzonych badań, w celach porównawczych, powtórzono w użyciu oprogramowania komercyjnego.

Zauważono, że oprogramowanie komercyjne nie zawsze radzi sobie z prawidłowym wykonaniem pomiarów. Opierając się na zebranych danych i wynikach obliczeń programu komercyjnego, zauważono, że rysowane wykresy nie są wykresami biegunowymi. Punkty zbierane podczas pomiarów nie są tymi samymi punktami podczas kolejnych obrotów, co zresztą ma fundamentalne znaczenie do obliczeń ruchów błędnych synchronicznych. Częściowy opis błędnego działania programu komercyjnego zamieszczono w [6], a szczegółowy w sprawozdaniu częściowym z niniejszego zadania. Przykładowe błędne wykresy oprogramowania komercyjnego przedstawiono na rys. 18-20.

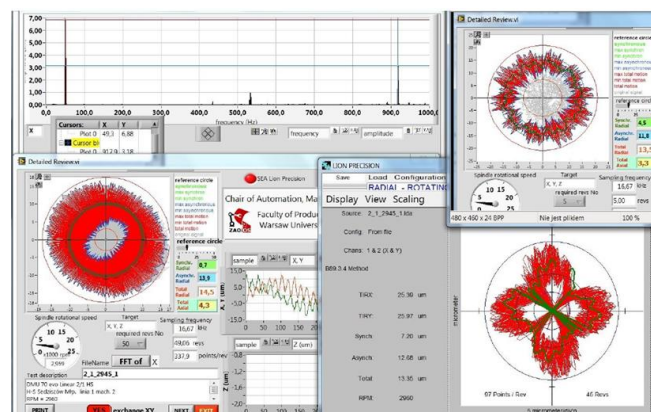


Rys. 18. Widok wykresu punktów zebranych podczas jednego obrotu (oprogramowanie komercyjne)

Dla punktów zebranych podczas jednego obrotu system wygenerował krzywą w kolorze czerwonym, czterokrotnie opasującą okrąg. Takie błędne przedstawienie danych jest dla wszystkich 45 obrotów. Linia obliczonej wartości średniej (zielona) również oplata okrąg kilkakrotnie, pomimo, że system traktuje wszystkie wyświetlone punkty jako zebrane podczas jednego obrotu. Linia średnia pojedynczych obrotów jest w przybliżonym kształcie okręgu, natomiast średnia ze wszystkich obrotów odbiega od takiego kształtu. Innym przykładem jest, że program komercyjny, w przypadku wrzecion o dużych wartościach ruchów błędnych źle wylicza prędkość obrotową wrzeciona np. ustawiono 5000 a prędkość wyliczona jest ok. 22000 min^{-1} . Przy zamianie kolejności czujników wykresy nie różnią się.



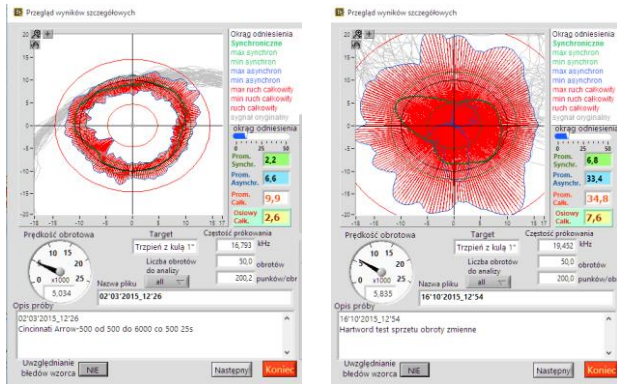
Rys. 19. Przykłady błędnych wykresów programu komercyjnego



Rys. 20. Porównanie wyników analizy tych samych danych oprogramowaniem komercyjnym i ABRWS

Przykłady wykresów uzyskanych z pomiarów wykonanych oprogramowaniem ABRWS zamieszczono na rys. 21-22. Przedstawione przykłady dotyczą badań dwóch centrów frezarskich w różnym stanie technicznym. Cincinnati Arrow 500 będące na wyposażeniu w laboratorium Instytutu i pracujące sporadycznie oraz Hartword 850 obrabiarki odkupiona z zakładu produkcyjnego, pracującej intensywnie kilka lat. W obrabiarce Hartword wystąpił problem z pomiarami błędów osiowego. Luzy na śrubie tocznej były na tyle duże, iż powodowały „pełzanie” wrzeciona i wychodzenie po za skalę pomiarową czujnika Z. Dla porównania na rys. 23 przedstawiono wyniki pomiarów elektrowrzeciona przemysłowego centrum obróbczego MoriSeiki. Centrum zakupiono do zakładu jako kilkuletnią maszynę używaną. Nie było wiarygodnej historii pracy maszyny, ani oceny jest stanu technicznego. Przeprowadzone badania ruchów błędnych,

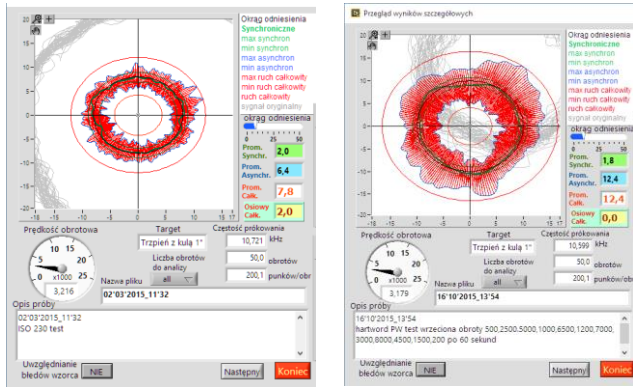
pozwołyły na ocenę stanu wrzeciona i pokazały, że jest to najdokładniejsze wrzeciono ze wszystkich badanych. Na rys. 24 przedstawiono nietypowe zamocowanie osprzętu do pomiarów na centrum obróbkowym Mori Seiki.



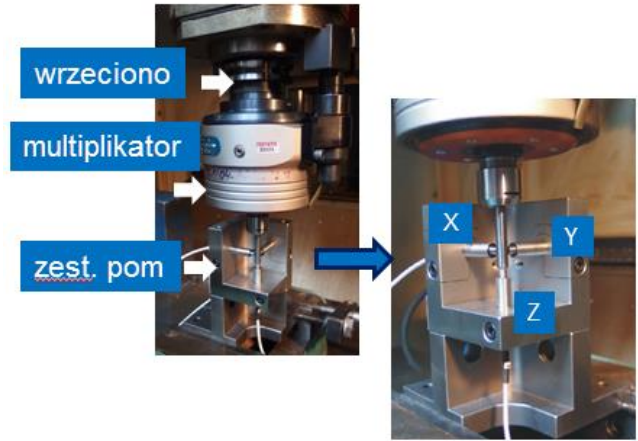
a) Rys. 21. Wykresy biegunowe przy nastawionej prędkości obrotowej wrzeciona 5000 min⁻¹ : dla Cincinnati Arrow 500 a) Hartword 850 b)



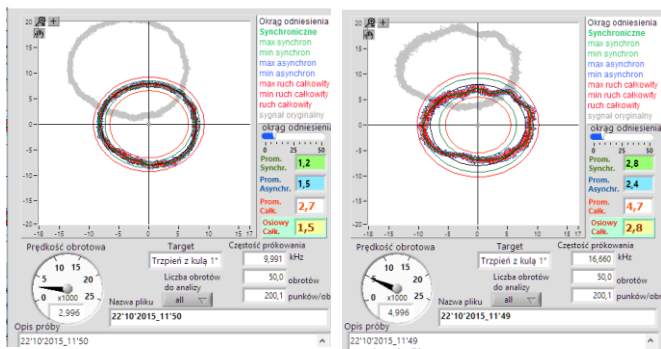
Rys. 24. Osprzęt pomiarowy na obrabiarkie Mori Seiki



a) Rys. 22. Wykresy biegunowe przy nastawionej prędkości obrotowej wrzeciona 3200 min⁻¹ : dla Cincinnati Arrow 500 a) Hartword 850 b)



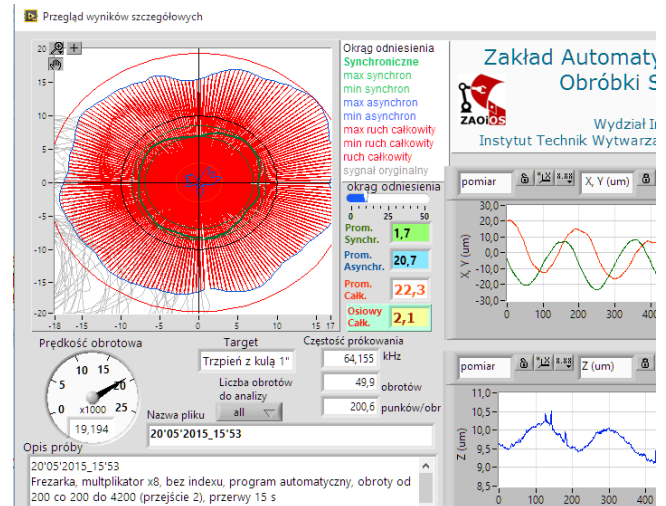
Rys. 25. Badania multiplikatora (x8) obrotów



Rys. 23. Rezultat badań Mori Seiki NT 3150 DCG

Przeprowadzono również pomiary ruchów błędnych multiplikatora obrotów zamocowanego we wrzecionie obrabiarki Cincinnati. Ze względu na ograniczenia średnicy mocowanego narzędzia, zamiast wzorca kulistego, przygotowano i zamocowano wzorzec z powierzchnią walcową (rys. 25).

Głównym mechanizmem multiplikatora jest przekładnia planetarna i jak można było się spodziewać w wynikach badań, dominujące są ruchy błędne asynchroniczne przy niewielkiej wartości błędów synchronicznych.



Rys. 26. Widok wyników szczegółowych pomiarów multiplikatora obrotów przy 19000 min⁻¹ wrzeciona

Oprogramowanie autorskie było testowane w różnych warunkach i różnych konfiguracjach sprzętowych. W trakcie rozwoju programu dopisano kilka użytecznych opcji np. badań wrzecion szlifierskich bez użycia dokładnego wzorca [7]. Oprogramowanie przygotowano do wykonywania pomiarów z badaniem wpływu temperatury na wartość ruchów błędnych. Przygotowano opcję z zastosowaniem wzorca

dwukulowego i 5 czujników. Autorzy są pewni poprawności zastosowanych algorytmów i metodyki prowadzonych pomiarów. Przygotowani są na dostosowanie programu do nawet nietypowych potrzeb użytkownika.

Podsumowanie

Badania ruchów błędnych wrzecion, jako jedno z badań diagnostycznych stanu obrabiarki, stają się coraz popularniejsze. W przemyśle można zaobserwować wzrastające zapotrzebowanie na takie badania ze strony zakładów produkcyjnych. Niestety szczególnie wtedy gdy występują problemy z utrzymaniem wymaganej jakości obróbki. Większość inżynierów utrzymania ruchu rozumie, że korzystniej jest zapobiegać awariom, prowadząc okresowe badania diagnostyczne, niż później usuwać skutki wadliwego działania obrabiarki. Nie wszyscy jednak wiedzą, że można w prosty i szybki sposób zdiagnozować bieżący stan wrzeciona. Na rynku są dostępne gotowe zestawy do badań ruchów błędnych. Zdaniem autorów, dostępny w sprzęt badawczy jest bardzo dobrej jakości i przemyślany pod względem konstrukcji i ergonomii. Jednakże można mieć zastrzeżenia co do prawidłowości działania komercyjnego oprogramowania oraz zastosowanych algorytmów obliczeniowych. Wąskie grono ośrodków badawczych zajmujących się ruchami błędnymi, wymagana specjalistyczna wiedza, drogi sprzęt pomiarowy spowodowały faktycznie monopol kilku firm na rynku ogólnosiwiatowym. Praktycznie do tej pory nie było jak porównać wyników pomiarów prowadzonych zestawem komercyjnym. Chociaż program komercyjny ma dużo opcji, ustawień i spore możliwości pomiarowe (np. badania odkształceń cieplnych, czy też bezpośrednie podłączenie do enkodera wrzeciona). Posługiwanie się nim wymaga wiedzy zarówno z dziedziny pomiarów jak i akwizycji oraz przetwarzania danych. Wykresy biegunowe generowane na podstawie obliczeń z oprogramowania komercyjnego według autorów nie są prawidłowe. Nie zmienia to jednak faktu, że do diagnostyki wrzecion obrabiarek są przydatne. Zmiana stanu wrzeciona będzie odzwierciedlona w zwiększeniu wartości wyliczanych przez program.

Podsumowując, w zadaniu badawczym realizowanym w ramach projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", opracowano unikalny, w pełni funkcjonalny autorski program do badań ruchów błędnych wrzecion ABRWS. Zdaniem autorów opracowane własne oprogramowanie i zastosowane w nim algorytmy, w sposób znacznie dokładniejszy wyznaczają wartości błędnych ruchów wrzeciona. Oprogramowanie działa w sposób całkowicie automatyczny samodzielnie dobierając ustawienia karty pomiarowej do rzeczywistej prędkości obrotowej wrzeciona. Praktycznie średnio wykształcony technik jest w stanie samodzielnie przeprowadzić pomiary. Potwierdzono możliwość adaptacji oprogramowania do potrzeb odbiorcy [7]. Program jest rozwijany, a planowane dalsze prace to między innymi połączenie z bazami danych, dostosowanie generowanych raportów do wymagań firmy zamawiającej, dołączenie innych modułów diagnostyki maszyn, np. odkształceń termicznych czy analizy modalnej. Zespół badawczy nie poprzestał na oprogramowaniu, ale doradza w zakupie niezbędnego sprzętu oraz we wdrażaniu systemu w zakładzie produkcyjnym. Oprogramowanie może być używane zarówno przez producentów obrabiarek (np. stanowisko testowania elektrowrzecion) jak i służby utrzymania ruchu w zakładzie produkcyjnym.

Podziękowanie

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

1. 230-7 ISO, "Test code for machine tools. Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation", 2006.
2. B89.3.4 ASME, "Axes of Rotation: Methods for Specifying and Testing", 1992.
3. Grejda R., Marsch E., Ryan V., "Techniques for calibrating spindles with nanometer error motion", Precision Engineering, No 29 (2005): s. 113-123.
4. Jemielniak K., "Analiza błędnych ruchów wrzecion szybkoobrotowych", *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, Nr 24/2 (2004): s.67-74.
5. Marsch E., "Precision Spindle Metrology", DEStech Publications, 2008.
6. Jemielniak K., Chrzanowski J., "Spindle error movements measurement algorithm and a new method of results analysis", *Journal of Machine Engineering*, Nr 1 (2015): s. 25-35.
7. Jemielniak K., Chrzanowski J., "Badania błędnych ruchów wrzecion szlifierek", *Mechanik*, Nr 8-9 (2015): s. 135-138.