

JANUSZ ŚLIWKA<sup>1</sup>  
MACIEJ KAŻMIERCZAK<sup>1</sup>

## **METODA WYZNACZANIA SZTYWNOŚCI STATYCZNEJ OBRABIAREK CIĘŻKICH W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH**

W artykule omówiono specyfikę badań własności statycznych obrabiarek ciężkich przeprowadzanych w warunkach przemysłowych. Przedstawiono problemy związane z tego typu badaniami, sposoby przeprowadzania pomiarów oraz przykładowe wyniki wraz z ich interpretacją. Artykuł zawiera wycinek doświadczeń nabytych, przez pracowników Katedry Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej w Gliwicach, podczas badań przeprowadzanych na kilkudziesięciu, różnej konstrukcji, obrabiarkach ciężkich.

### **1. WPROWADZENIE**

Głównym celem większości badań odbiorczych obrabiarek jest w zasadzie stwierdzenie, czy obrabiarka w czasie pracy będzie zapewniała wytwarzanie przedmiotów z zachowaniem żądanej dokładności wymiarowej i kształtowej. Najczęściej stosowane badania dokładności geometrycznej obrabiarek w gruncie rzeczy dotyczą jedynie dokładności wykonania samej obrabiarki i niemal z reguły przeprowadzane są w stanie nieobciążonym obrabiarki. Z tego powodu należy podkreślić, że nawet najdokładniej wykonana i zmontowana obrabiarka nie zawsze zapewnia osiągnięcie żądanych dokładności wymiarowych przedmiotu w czasie pracy.

Właściwości statyczne (sztywności) wybranych elementów obrabiarek w sposób bezpośredni wpływają na dokładność wymiarowo - kształtową wykonywanych na nich przedmiotów. Tak więc odkształcenie postaciowe, np. suwaka pionowego tokarki karuzelowej pod działaniem odporowej siły skrawania przy toczeniu wzdłużnym, odwzorowuje się na zmianie toczzonej średnicy w stosunku 2:1. Określenie właściwości statycznych takich elementów jak np. belki suportowe tokarek karuzelowych, na etapie projektowania jest bardzo trudne. Alternatywą jest metoda elementów skończonych, ale i ona nie daje pełnego, dokładnego opisu właściwości statycznych konstrukcji. Spowodowane jest to przede wszystkim trudnościami w dokładnym uwzględnieniu sztywności stykowych licznych połączeń poszczególnych zespołów układu nośnego

---

<sup>1</sup> Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska w Gliwicach

obrabiarki. W przypadku obrabiarek odkształcenia stykowe spowodowane siłami skrawania i ciężkości mogą stanowić do 60% odkształceń całkowitych [1].

Istnieje zauważalna tendencja do stosowania w procesie projektowo-konstrukcyjnym coraz to nowszych metod obliczeniowych i optymalizacyjnych. Metody te obejmują swym zakresem coraz to nowsze zagadnienia. Jedną z dróg, coraz powszechniej stosowaną do urealniania modeli obliczeniowych tj. do identyfikacji niektórych ich parametrów, jest pomiar rzeczywistych parametrów układu nośnego obrabiarki (UNO), w tym i sztywności statycznej.

## 1. BADANIA SZTYWNOŚCI STATYCZNEJ

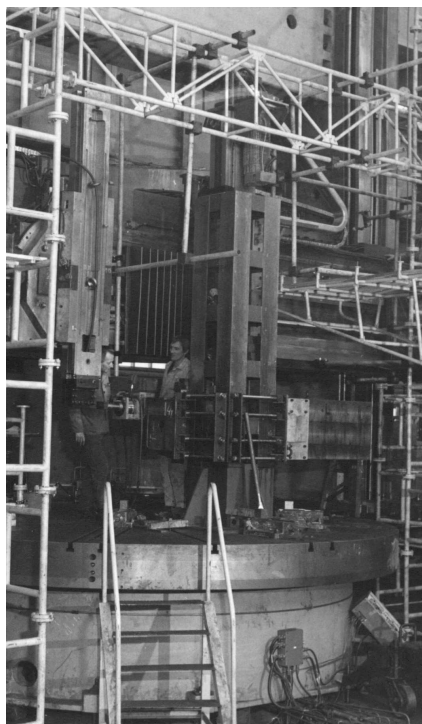
Określenie właściwości statycznych obrabiarek nowo produkowanych odbywa się z reguły na zakończenie procesu produkcji. Działania takie mają sens w przypadku produkcji seryjnej. W przypadku produkcji jednostkowej oraz obrabiarek wyprodukowanych wcześniej zachodzi konieczność przeprowadzania badań właściwości eksploatacyjnych tych maszyn w warunkach przemysłowych. Specyfika badań obrabiarek w warunkach przemysłowych determinowana jest trzema faktami. Po pierwsze przeprowadzenie badań wymaga wyłączenia z produkcji badanej obrabiarki, co zazwyczaj łączy się z bardzo dużymi kosztami. Dlatego też, badane obrabiarki udostępniane są zazwyczaj na nie dłużej jak na jedną zmianę roboczą. Po drugie badania odbywają się na hali produkcyjnej, najczęściej bez zatrzymania produkcji na sąsiednich maszynach. Powoduje to konieczność uwzględniania w planach badań istnienia znacznych niekiedy zakłóceń w postaci drgań przenoszonych z zewnątrz oraz zakłóceń elektromagnetycznych. Po trzecie brak jest jednoznacznych unormowań dotyczących tego typu badań, co stwarza problemy z interpretacją wyników pomiarów.

Pomiary przeprowadzane w warunkach przemysłowych odgrywają znaczącą rolę szczególnie w odniesieniu do obrabiarek produkowanych jednostkowo. W przypadku takich maszyn każdy z produkowanych egzemplarzy jest w zasadzie prototypem o nieznanach bliżej właściwościach sztywnościowych. Dodatkowo współczesny rynek wymusza na producencie drastyczne skrócenie czasu produkcji nowej maszyny, uniemożliwiając tym samym przeprowadzenie dokładnych badań obrabiarki w ramach procesu produkcji.

Przykładem obrabiarek produkowanych jednostkowo, których badania właściwości sztywnościowych nastroczają szczególnie trudności są wielkogabarytowe obrabiarki ciężkie. Najistotniejszym problemem technicznym podczas badań sztywności statycznej tego typu maszyn jest konieczność pomiaru odkształceń rzędu kilku  $\mu\text{m}$  na korpusie o wymiarach gabarytowych rzędu kilkunastu metrów np. długość belki suportowej tokarki karuzelowej KCH 700/800 wynosi około 12 metrów. W praktyce dla czujników przemieszczeń buduje się kratownicowe rusztowanie wokół obrabiarki, jak to pokazano na rys. 1. W celu odizolowania rusztowania od drgań buduje się osobne rusztowania dla obsługi czujników lub stosuje się ruchome podesty. Pomiar sztywności obrabiarki ciężkiej wymaga wyłączenia z produkcji nie tylko samej badanej obrabiarki, ale również hali produkcyjnej, w której ona się znajduje (eliminowanie wpływu drgań sąsiednich obrabiarek i suwnic) na okres nie krótszy niż kilka dni.

Celem badań właściwości statycznych jest przede wszystkim określenie charakterystyk sztywnościowych oraz współczynników sztywności statycznej. Z uwagi na ograniczony zakres pomiarów nie przeprowadza się analiz sztywności całego UNO a jedynie wybranych elementów obrabiarki, mających największy wpływ na dokładność obróbki. Wybór elementów poddanych badaniom, wybór punktów pomiarowych, jest jedną z najistotniejszych decyzji podejmowanych na wstępie każdego badania. Większość obrabiarek ciężkich, takie jak tokarki karuzelowe, buduje się w układzie portalowym, co jednoznacznie narzuca sposób doboru punktów pomiarowych.

W takich przypadkach rozpatrujemy wzajemne przemieszczenia wierzchołka ostrza (WO), najczęściej wybranego punktu na imaku narzędziowym względem bazy obróbczej przedmiotu obrabianego (powierzchni stołu obrabiarki). Na rys.2. pokazano sposób rozmieszczenia punktów pomiarowych podczas badań tokarki karuzelowej. Na uwagę zasługuje fakt, iż w tym przypadku istnieje konieczność budowy dodatkowego układu odniesienia, stanowiącego bazę dla czujników przemieszczeń.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe stosowane do pomiaru przemieszczeń zespołów tokarki karuzelowej podczas badań sztywnościowych [1]

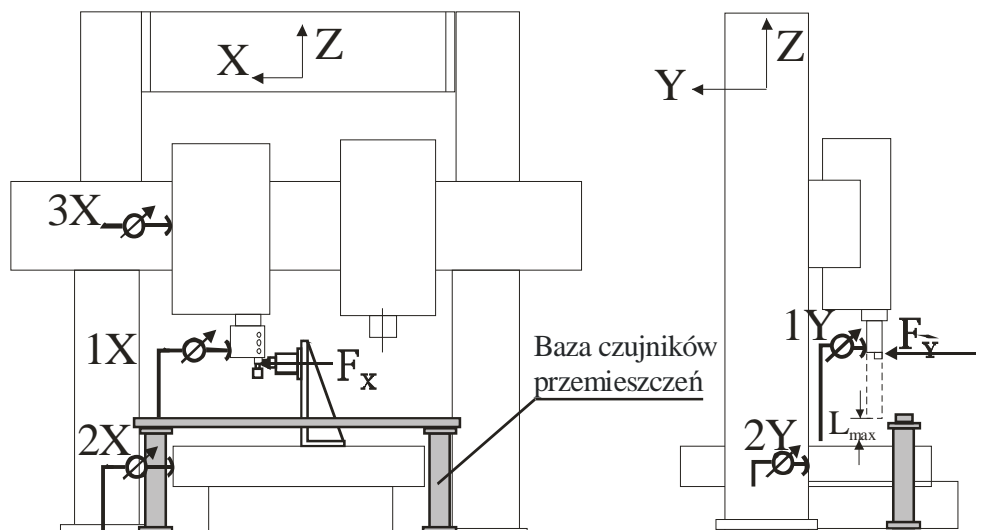
Fig. 1. Measurement stand used for measuring displacement range of vertical lathe units during stiffness research [1]

Takie usytuowanie punktów pomiarowych umożliwia nie tylko jakościową, ale i ilościową ocenę wpływu sztywności takich elementów obrabiarki jak: suwak, suport i stół obrotowy na dokładność pracy. W przypadku obrabiarek ciężkich odkształcenia korpusów stojaków i belki suportowej są pomijalnie małe. W pracy [1] zawierającej jedną z nielicznych pełnych analiz układów nośnych obrabiarek ciężkich i wielkogabarytowych

oszacowano procentowy udział odkształcenia stojaków na około 7% sztywności całej obrabiarki. Współczynnik sztywności obrabiarki definiowany jest jako iloraz wartości siły wymuszającej i przemieszczenia wierzchołka ostrza, mierzonego w kierunku działania tej siły.

W wielu przypadkach po stwierdzeniu dostatecznie dużej, w porównaniu z innymi mierzonymi elementami obrabiarki, sztywności stołu (wskazania czujnika 1Y z rys. 2) można zrezygnować ze stosowania niezależnego układu odniesienia dla czujników przemieszczeń. W takim przypadku zakłada się, że stół obrabiarki stanowi bazę pomiarową. Badania prowadzi się dla następujących konfiguracji:

- dla minimalnego, średniego i maksymalnego wysuwu suwaków w dwóch kierunkach, tj. X i Y, (kierunek Z najczęściej pomija się, gdyż na podstawie wcześniej prowadzonych badań ustalono, że wskaźniki sztywności w osi Z znacznie przewyższają wartości wskaźników sztywności dla dwóch pozostałych osi),
- dla dwóch położen suportów na belce suportowej w kierunkach X i Y: skrajnego i centralnego w pobliżu osi stołu.



Rys. 2. Sposób rozmieszczenia czujników przemieszczeń podczas badań sztywności tokarki karuzelowej [6]  
Fig. 2. The positioning of displacement sensors during the stiffness research conducted on a vertical lathe [6]

### 3. METODY WYZNACZANIA SZTYWNOŚCI STATYCZNEJ

W badaniach posłużono się dwoma doświadczalnymi metodami wyznaczania sztywności statycznej wielkogabarytowych obrabiarek ciężkich:

- metodą konwencjonalną,
- metodą Dynamiczną Wyznaczania Sztywności Statycznej (DWSS).

Obie przyjęte do badań metody dobrano w taki sposób, aby umożliwiły określenie wybranych właściwości statycznych obrabiarek w warunkach przemysłowych.

Za zastosowaniem metody konwencjonalnej przemawiało jej powszechne wykorzystywanie w praktyce przemysłowej od wielu lat. Umożliwiało to porównanie wyników badań z badaniami prowadzonymi we wcześniejszych latach w ramach prac prowadzonych przez różne jednostki naukowe jak i zakłady przemysłowe.

### 3.1. METODA KONWENCJONALNA WYZNACZANIA SZTYWNOŚCI STATYCZNEJ

Metoda konwencjonalna (tradycyjna) wyznaczania sztywności statycznej obrabiarek polega na obciążeniu obrabiarki siłami imitującymi składowe siły skrawania oraz na pomiarze przemieszczeń wybranych elementów obrabiarki.

Do pomiaru sztywności statycznej obrabiarkę należy odpowiednio przygotować. Przygotowanie obrabiarki obejmuje zaciśnięcie lub unieruchomienie wszystkich zespołów obrabiarki, które w czasie pracy są unieruchomione. Pozostałe zespoły obrabiarki, które w czasie pracy znajdują się w stanie nie zaciśniętym należy pozostawić w czasie pomiaru w takim samym stanie. Zespoły obrabiarki, które w czasie pomiaru należy przemieszczać w celu osiągnięcia zadanej pozycji, należy przesuwac ruchem ciągłym w kierunku przeciwnym do składowej stałej siły obciążającej.

Po przygotowaniu obrabiarki do pomiaru należy ją trzykrotnie obciążyć i odciążyć do wartości siły maksymalnej. Po trzecim obciążeniu i odciążeniu wskazania czujników należy przyjąć jako wskazania zerowe. Wartość i kierunek działania maksymalnej siły obciążającej przyjmuje się zgodnie z zaleceniami zawartymi w normach dotyczących badanej obrabiarki.

Pomiar sztywności statycznej polega na rejestrowaniu wskazań czujników przemieszczeń dla każdej wartości siły, zarówno przy obciążaniu, jak i przy odciążaniu obrabiarki. Podczas pomiarów przemieszczeń w metodzie konwencjonalnej, należy zwrócić uwagę na takie umieszczenie czujników, aby przemieszczenia wybranych zespołów mierzone były w kierunkach zgodnych z kierunkami działania składowych siły skrawania.

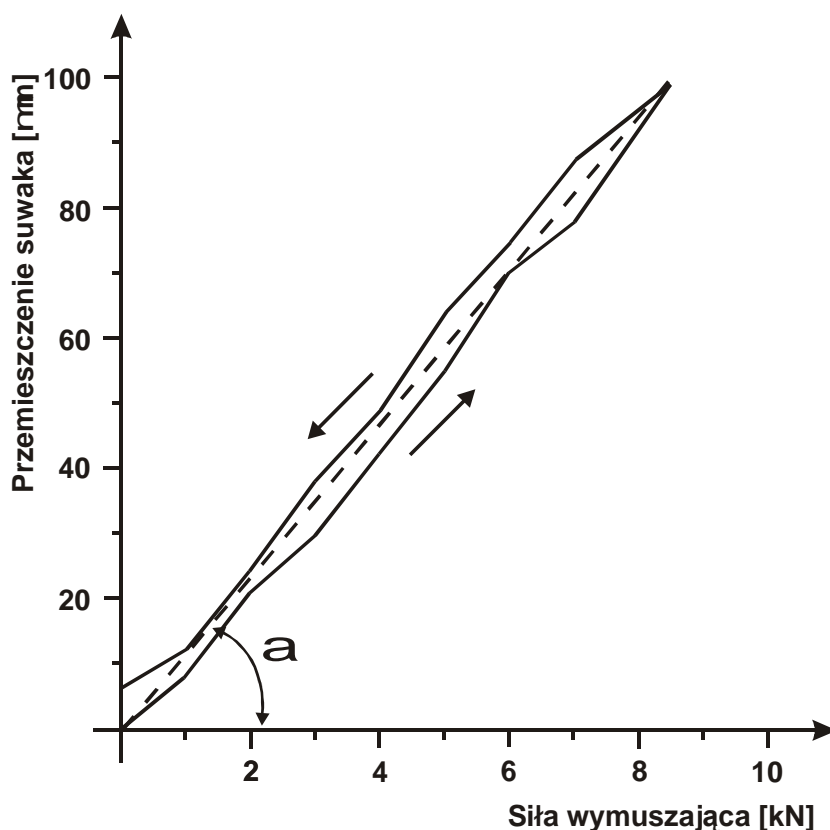
W oparciu o przeprowadzone pomiary buduje się wykres w układzie siła-przemieszczenie, obrazujący przebieg przemieszczenia wybranego punktu pod wpływem obciążenia (rys. 3). Na wykresie tym zazwyczaj widoczne jest pole histerezy proporcjonalne do energii zużytej na pokonanie sił tarcia podczas obciążania i odciążania obrabiarki. Jeżeli w badanej obrabiarence występują luzy lub deformacje stałe to na wykresie sztywnościowym krzywa odciążenia nie powraca do początku układu współrzędnych.

Często charakterystyki sztywnościowe obrabiarek są nieliniowe. Wówczas wskaźniki sztywności wyznacza się według krzywej obciążenia. W przypadku nieliniowych charakterystyk, zalecane jest wyznaczenie wskaźników sztywności statycznej, dla przyrostów obciążenia odpowiadających odcinkom o stałym nachyleniu krzywej.

Za wskaźnik sztywności przyjmuje się najmniejszą z wartości wyznaczonych dla kolejnych przyrostów obciążenia. W przypadku wystąpienia liniowej charakterystyki sztywnościowej, wskaźnik sztywności możemy wyznaczyć jako stosunek maksymalnej siły obciążającej  $P_{\max}$  do maksymalnego przemieszczenia  $\delta_{\max}$ .

$$c = \frac{P_{\max}}{\delta_{\max}} \quad [N / \mu m]$$

Do obciążania obrabiarek ciężkich przeważnie używany jest siłownik hydrauliczny, który umożliwia uzyskanie płynnie zmieniającej się siły od zera do przyjętej wartości maksymalnej. Do pomiaru rzeczywistej wielkości siły obciążającej stosowany jest siłomierz. Do pomiaru przemieszczeń zalecane jest stosowanie zegarowych czujników przemieszczeń, o wartości działki elementarnej 0,001mm [7]. Ze względu na łatwość zautomatyzowania czynności związanych z pomiarem przemieszczeń mogą być też stosowane czujniki indukcyjne. Czujniki takie powinny charakteryzować się dokładnością  $0,25 \div 0,5\%$  zakresu pomiarowego. Jedynym wymogiem jest w tym przypadku kulista końcówka pomiarowa czujnika i nie za duży zakres pomiarowy w stosunku do wartości mierzonych.



Rys. 3. Wykres w układzie siła-przemieszczenie, tzw. charakterystyka sztywnościowa

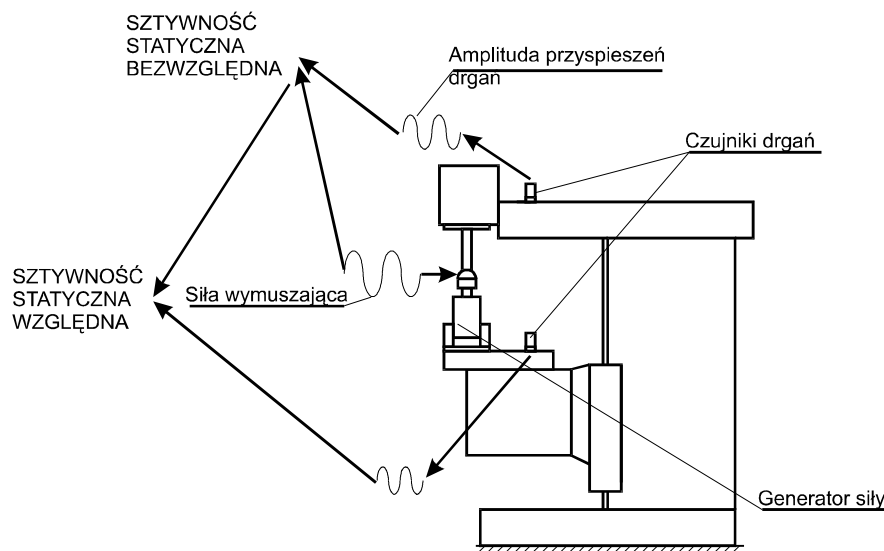
Fig. 3. Force – displacement function i.e. stiffness characteristics

### 3.2. METODA DYNAMICZNA WYZNACZANIA SZTYWNOŚCI STATYCZNEJ

Metoda dynamiczna wyznaczania sztywności statycznej obrabiarek DWSS bazuje na równości przemieszczenia wybranego zespołu obrabiarki wywołanego siłą statyczną, z amplitudą przemieszczenia tego samego zespołu wywołanego zmienną siłą dynamiczną, o amplitudzie równej wartości siły statycznej (schemat ideowy rys. 4). Takie zjawisko występuje, jeżeli częstotliwość siły wymuszającej jest znacznie niższa od najniższej częstotliwości drgań własnych rozpatrywanego obiektu.

Metoda DWSS polega na pomiarze drgań wymuszonych siłą harmoniczną o odpowiednio niskiej częstotliwości. Wartość wskaźników sztywności statycznej wyznacza się jako iloraz wartości amplitudy siły obciążającej i wartości amplitudy przemieszczenia. Amplitudę przemieszczenia wyznacza się na podstawie amplitudy przyspieszenia drgań mierzonych za pomocą czujników sejsmicznych. Zastosowanie czujników sejsmicznych jest jedną z głównych zalet tej metody w porównaniu do wcześniej opisanej metody konwencjonalnej. Taki sposób pomiaru wiąże się jednak z koniecznością przeliczania wartości zarejestrowanych amplitud przyspieszeń drgań na amplitudy przemieszczeń. W celu określenia amplitudy przemieszczeń przyjmuje się, że rejestrowany przebieg przyspieszeń amplitudy wywołany jest wolnozmienną siłą harmoniczną a rozpatrywany układ jest układem liniowym lub linearyzowalnym.

Pomiar z wykorzystaniem czujników sejsmicznych dokonywany jest w układzie bezwzględny, więc w przypadku wyznaczania sztywności względnej konieczne jest zastosowanie dwóch czujników drgań umieszczonych na elementach, których sztywność względną wyznaczamy.



Rys. 4. Schemat ideowy metody dynamicznej DWSS [5]  
 Fig. 4. Block diagram presenting dynamic method DDSS [5]

Pomiary w metodzie DWSS powtarza się dla kilku różnych wartości składowej stałej siły wymuszającej, ze względu na nieliniowość charakterystyk sztywnościowych obrabiarek. Następnie, w oparciu o zarejestrowane sygnały pomiarowe buduje się charakterystykę sztywnościową badanej obrabiarki. Przykładowy wykres pokazano na rys. 5.

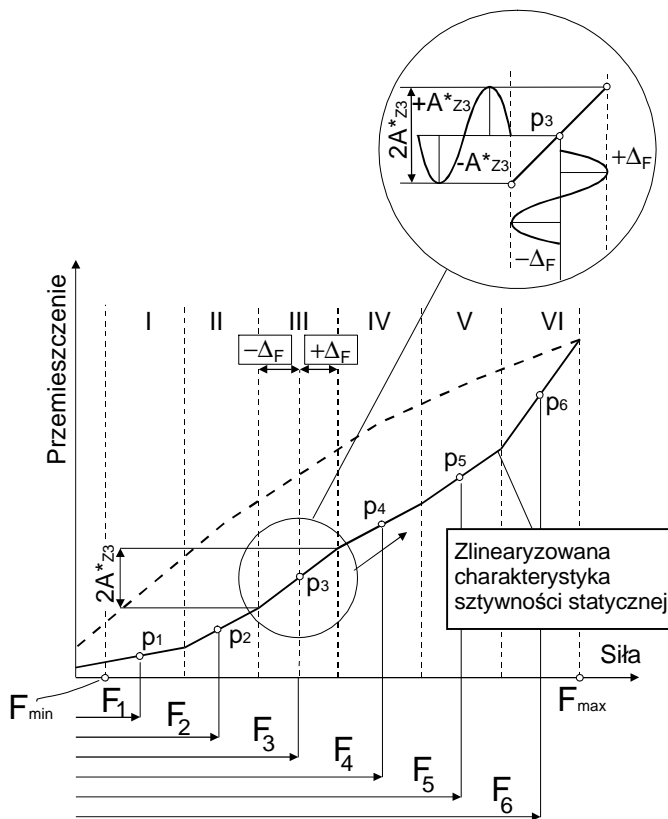
Badania przeprowadza się tylko dla rosnących wartości składowej stałej siły wymuszającej. Przy budowie charakterystyki należy przyjąć założenie, że amplituda siły wymuszającej jest stała, a jej wartość jest zgodna z zależnością:

$$\Delta_p = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2k}$$

gdzie:

$P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  – maksymalna, minimalna wartość siły obciążającej,

$k$  – liczba przedziałów linearyzacji.



Rys. 5. Charakterystyka sztywności statycznej i zasada podziału na podzakresy I, II, III, IV..., w których wyznaczana będzie sztywność statyczna metodą dynamiczną

Fig. 5. Characteristic of the static stiffness and rule of partitioning on the sub-ranges I, II, III, IV... in which the static stiffness is determined

W powyższej zależności występuje parametr  $k$ , którego obecność jest wynikiem poczynionego założenia o liniowości charakterystyki statycznej badanego obiektu lub o jej linearyzowalności. W przypadku obrabiarek charakteryzujących się nieliniowymi charakterystykami sztywnościowymi możemy mówić jedynie o wyznaczaniu lokalnych wskaźników sztywności, wyznaczanych wokół wybranych punktów charakterystyki sztywności, tj. wokół punktów linearyzacji (rys. 5).

#### 4. STANOWISKO BADAWCZE

Stanowisko stosowane do wyznaczania sztywności statycznej składa się z następujących elementów:



- przestrajalnego hydraulicznego generatora siły umożliwiającego uzyskanie quasi-statycznej lub sinusoidalnie zmiennej siły o stopniowo nastawianej częstotliwości w zakresie  $1\div 10\text{Hz}$ , bezstopniowo nastawialnej amplitudzie i składowej stałej w zakresie od  $0\div 26\text{kN}$ ,
- dotykowych czujników indukcyjnych przemieszczenia firmy VIS typ MDKa-C-3 o zakresie pomiarowym  $\pm 0,5\text{mm}$  i firmy Peltron o zakresie  $\pm 1\text{mm}$ ,
- czujników drgań o podwyższonej czułości firmy PCB Piezotronic typu M393B12 do pomiaru przemieszczeń,
- komputera pomiarowego z kartą analogowo-cyfrową, umożliwiającą rejestrację kilku sygnałów pomiarowych równocześnie oraz oprogramowania umożliwiającego częściową automatyzację pomiarów,
- statywu siłownika hydraulicznego umieszczonego na stole tokarki, który umożliwia mocowanie generatora siły w różnych kierunkach i na różnej wysokości.

## 5. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ SZTYWNOŚCI STATYCZNEJ

Jako przykładowe omówiono wyniki badań przeprowadzone dla dwu frezarek bramowych: frezarki bramowej typu FB 200 CNC i nowo wyprodukowanej frezarki bramowej HSM 180 CNC. Maszyny pokazane zostały na rys. 6. Obie obrabiarki są frezarkami bramowymi z przesuwaną belką, sterowane numerycznie przeznaczone do wykonywania różnych operacji obróbczych takich jak: frezowanie, rozwiercanie, wiercenie, wytaczanie i gwintowanie. Przy podobnych wymiarach gabarytowych frezarka HSM 180 charakteryzuje się „lżejszym” układem nośnym z uwagi na to iż przeznaczona jest przede wszystkim do obróbki szybkościowej.



Rys. 6. Badane frezarki bramowej, po prawej FB 200 CNC, po lewej HSM 180 CNC [10]  
Fig. 6. Planer mills under study, FB 200 CNC on the right, HSM 180 CNC on the left [10]

Wyniki pomiarów prezentowane są najczęściej w postaci charakterystyk sztywnościowych (takich jak te pokazane na rys. 7 i 8), na podstawie których określa się wskaźniki sztywności podzespołów obrabiarki, szacuje liniowość przebiegów, histerezę oraz ewentualne luzy. Wskaźniki sztywności oblicza się dwoma metodami:

Metoda 1: Wskaźnik sztywności statycznej uzyskany jako współczynnik kierunkowy prostej regresji wyznaczonej dla punktów pomiarowych.

Metoda 2: Wskaźnik sztywności statycznej obliczony jako iloraz maksymalnej siły obciążającej i maksymalnego, wywołanego tą siłą, przemieszczenia. Metoda ta zalecana jest przez normy w przypadku liniowej charakterystyki sztywnościowej badanego obiektu.

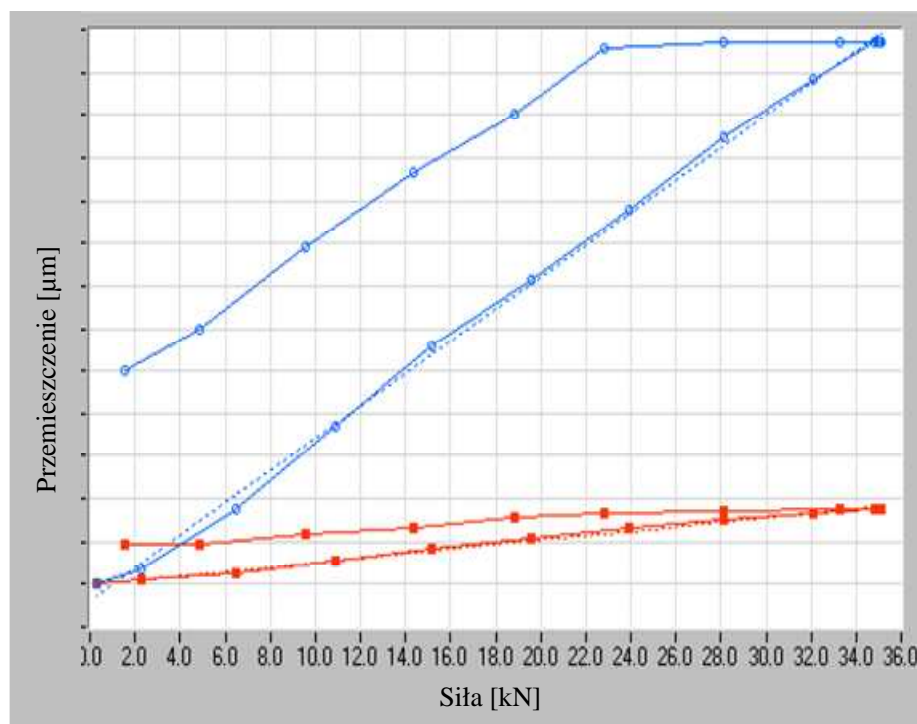
Na podstawie charakterystyk sztywnościowych (rys.7 i 8) określono następujące wskaźniki sztywności:

Dla suportu frezarskiego centrum obróbkowego HSM 180 CNC:

- sztywność suwaka: metoda 1 – 132,2kN/mm,  
metoda 2 = 138,0kN/mm,
- sztywność suportu: metoda 1 – 951,7kN/mm,  
metoda 2 - 995,4kN/mm.

Dla suportu frezarskie centrum obróbkowego FB 200 CNC:

- sztywność suwaka: metoda 1 – 141,88kN/mm,  
metoda 2 - 167,62kN/mm,



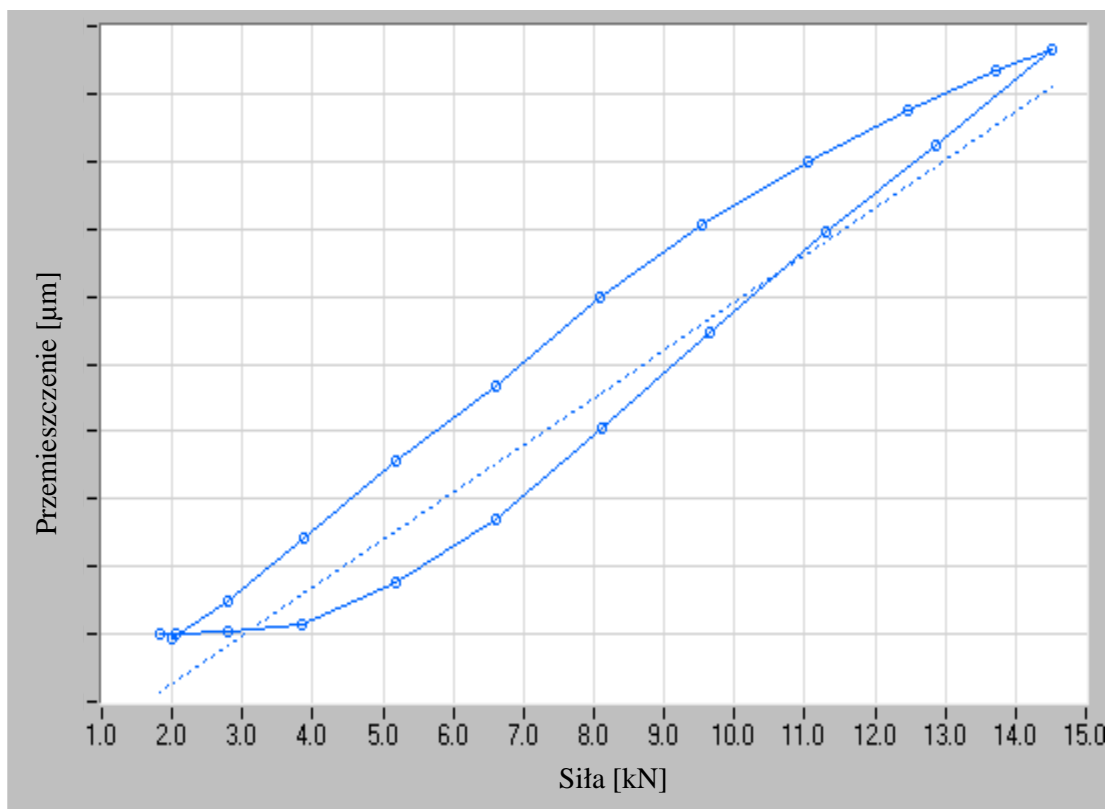
Rys. 7. Wykres w układzie siła-przemieszczenie dla położenia centralnego suportu frezarskiego centrum obróbkowego HSM 180 CNC przy wysuwie suwaka 1200mm i wymuszeniu w kierunku osi Y; kolorem niebieskim oznaczono przemieszczenia suwaka, a kolorem czerwonym przemieszczenia suportu [9]

Fig. 7. The chart presenting force-displacement pattern, for the positioning of the main milling machine's slide of the machining center HSM 180 CNC with the slider's feed of 1200mm and coercion towards Y axis; slider's displacement is marked in blue, whereas slide's displacement is marked in red [9]

Zazwyczaj uproszczona metodyka badań właściwości statycznych ogranicza się tylko do wyznaczania przemieszczenia wierzchołka ostrza względem powierzchni bazowej przedmiotu obrabianego dla różnych kierunków obciążeń i różnych położen zespołów roboczych maszyny. Wyniki takich badań są niezwykle interesujące dla użytkownika obrabiarki, gdyż świadczą o możliwej do uzyskania dokładności pracy maszyny. Konstruktorów obrabiarek interesują nieco głębsze analizy. Jedną z takich analiz jest detekcja słabych ogniw w UNO.

W przypadku obrabiarek ciężkich suwaki są elementami o największej podatności. Dodatkowo, podatność ta silnie rośnie wraz z wysuwem suwaka. Widać to na kolejnym rysunku (rys. 9) gdzie przedstawiono zestawienie wskaźników sztywności w osi Y dla trzech wysuwów suwaka centrum obróbkowego HSM 180 CNC.

W przypadku małego wysuwu suwaka o wypadkowej sztywności decyduje sztywność stykowa. Wtedy to charakterystyka sztywnościowa jest silnie nieliniowa, a z tego wynika znaczna różnica pomiędzy wskaźnikami sztywności obliczonymi metodą 1 i 2. W przypadku maksymalnego wysuwu o sztywności decyduje sztywność postaciowa samego suwaka. W tym przypadku charakterystyka sztywnościowa jest zbliżona do charakterystyki liniowej, a różnice pomiędzy wskaźnikami sztywności obliczonymi różnymi metodami są nieznaczne.

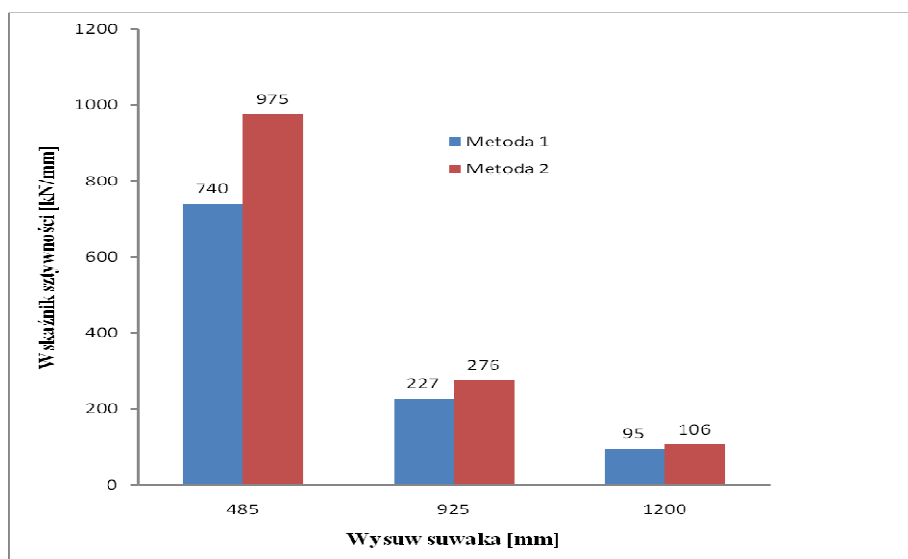


Rys. 8. Wykres w układzie siła-przemieszczenie dla położenia centralnego suportu frezarskiego centrum obróbkowego FB 200 CNC przy wysuwie suwaka 940mm i wymuszeniu w osi Y

Fig. 8. Force displacement function for central positioning of the slide of the milling machine FB 200 CNC for the side feed of 940mm and the force application along Y axis

Kolejnym słabym ogniwem, o którego analizę można rozszerzyć plan badań sztywnościowych jest połączenie suwak – imak narzędziowy [1]. Przemieszczenia w tym połączeniu mogą stanowić do około 17 % w bilansie przemieszczeń całej obrabiarki, a w odróżnieniu od pozostałych podzespołów obrabiarki zmiany konstrukcyjne podnoszące jego sztywność są stosunkowo proste do przeprowadzenia.

Porównanie własności statycznych obrabiarek o podobnej lub takiej samej konstrukcji może być bardzo przydatne w ocenie wykonania i montażu tych maszyn. W przypadku, gdy dwie obrabiarki tej samej konstrukcji różnią się znacząco pod względem np. sztywności może to świadczyć o błędach popełnionych na etapie wykonania lub montażu jednej z nich [7].



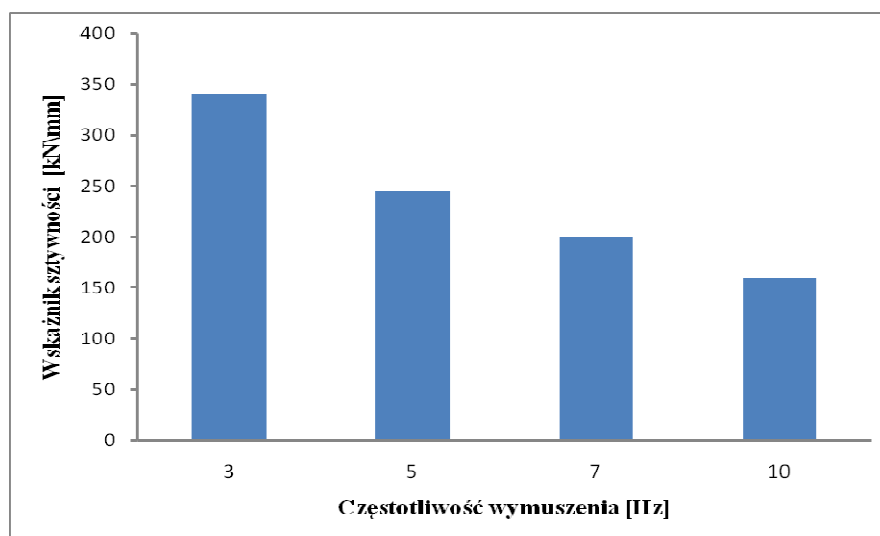
Rys. 9. Zależność wskaźnika sztywności w kierunku osi Y od wysuwu suwaka frezarskiego centrum obróbkowego HSM 180 CNC

Fig. 9. Dependence of the stiffness indicator towards Y axis on the slide's feed of the milling machine HSM 180 CNC

W przypadku wyznaczania sztywności statycznej metodą DWSS zauważono oddziaływanie częstotliwości siły wymuszającej na uzyskiwane wyniki pomiarów. Zależność ta uwidaczniała się szczególnie w przypadkach, kiedy wymuszenie siłowe działało w kierunku serwonapędu (dla frezarek bramowych takich jak frezarskie centrum obróbkowe FB 200 CNC w kierunku osi X – patrz rys. 1). Na rys. 10. pokazano sztywności suportu frezarki bramowej uzyskane dla różnych częstotliwości siły wymuszającej. W przypadku tym po zwiększeniu częstotliwości siły wymuszającej z 3 do 10Hz sztywność spadła o około 50 % ( z 336kN/mm do 156 kN/mm). Zjawisko takie nie występowało dla wymuszenia działającego w kierunku osi Y, kiedy to suport dociskany jest do prowadnic belki suportowej.

Za przyczynę takiego stanu rzeczy uważa się to, iż w przypadku wymuszenia w kierunku osi X obciążenie przejmowane jest przez serwonapęd obrabiarki, a więc zależy nie tylko od wytrzymałości UNO, ale również od parametrów elektryczno - elektronicznych układu napędowego. W Katedrze Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej prowadzono

badania mające na celu określenie wpływu parametrów pracy serwonapędów na sztywność statyczną, a ich szczegółowe wyniki można znaleźć w pracy [8].



Rys. 10. Zależność wskaźników sztywności suportu frezarskiego centrum obróbkowego typu FB 200 CNC od częstotliwości wymuszenia

Fig. 10. Dependence of stiffness indicators of the slide of a milling machine FB 200 CNC type on the input frequency

## 6. PODSUMOWANIE

Z uwagi na przeglądowy charakter niniejszego artykułu zamieszczone w podsumowaniu stwierdzenia mają charakter ogólny. Szczegółowe wnioski dotyczące wybranych aspektów pomiarów sztywności stycznej obrabiarek ciężkich w warunkach przemysłowych można znaleźć w publikacjach [5],[6],[8],[9].

Omówiona metodyka identyfikacji cech statycznych obrabiarek ciężkich w połączeniu z badaniami właściwości dynamicznych, sprawdzeniem dokładności geometrycznej oraz uzupełniona próbą pracy pozwala ocenić cechy eksploatacyjne danej maszyny. Takie sprawdzenie jakości maszyny ma w przypadku obrabiarek ciężkich szczególne znaczenie, gdyż są to obrabiarki produkowane w bardzo krótkich seriach (kilka sztuk), bez badań prototypowych.

Badania doświadczalne statycznych charakterystyk UNO i układów prowadnicowych wykazują niedostosowanie wyników badań mechaniki kontaktu, jako danych dla wyznaczenia parametrów do struktur modeli elementów skończonych. Skojarzenie takie prowadzi do dużych błędów oszacowań sztywności konstrukcji. Jednym ze sposobów zapobiegania temu jest identyfikacja parametrów na podstawie badań doświadczalnych obiektów rzeczywistych [2],[3],[4].

Dzięki badaniom cech statycznych producent uzyskuje informacje, które umożliwią ewentualną modyfikację następnych wersji maszyn; użytkownik natomiast zyskuje wiedzę o możliwościach eksploatacyjnych posiadanego egzemplarza obrabiarki. W przypadku badań przeprowadzanych w warunkach przemysłowych zakres analizowanych zagadnień

zawsze uwarunkowany jest czasem dostępu do badanej obrabiarki. Porównanie wyników uzyskiwanych metodą konwencjonalną i metodą DWSS zostanie omówione w kolejnym artykule.

#### LITERATURA

- [1] ZEWELD S., 1990, *Ocena porównawcza struktury nośnej obrabiarek ciężkich*, Rozprawa doktorska, Gliwice.
- [2] SZWENGIER G., 1996, *Obliczenia projektowe układów przewodnicowych obrabiarek*, *Postępy technologii maszyn i urządzeń*, 20/2, Oficyna Wydawnicza Pol. Rzeszowskiej.
- [3] TÖNSHOFF H. K., WASMANN U., 1995, *Updating the structural model of machines using measurements of the static deformation*, *Production Engineering*, II/2.
- [4] WECK M., ECKSTEIN R., 1985, *Stan i tendencje w badaniach i ocenie dynamicznych właściwości obrabiarek*, *Mechanik*, 6.
- [5] ŚLIWKA J., 1999, *Wyznaczanie sztywności statycznej obrabiarek metodą wymuszenia dynamicznego*, Rozprawa doktorska, Gliwice.
- [6] Projekt celowy KBN nr 10 T07 014 2000 C/5269, 2001, *Badania analityczne i weryfikacyjne badań doświadczalnych dwustojakowych karuzelowych centrów obróbkowych typu KCI*, Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, FO RAFAMET, Gliwice, Kuźnia Raciborska.
- [7] KOSMOL J., ŚLIWKA J., 2003, *Powtarzalność cech statycznych obrabiarek ciężkich*, *Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej*, 84, seria: Konferencje, 41, t. I, Referaty plenarne i sesyjne, Wrocław, 533-540.
- [8] Projekt badawczy KBN nr 5 T07D 002 23, 2002-2005, *Wyznaczanie sztywności statycznej obrabiarek sterowanych numerycznie metodą dynamiczną*, Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice.
- [9] Projekt celowy KBN nr 6 T07 2003 C/06218, 2003, *Wdrożenie nowej generacji frezarek bramowych typu HSM 180 CNC*, Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, FO RAFAMET, Gliwice, Kuźnia Raciborska.
- [10] Materiały internetowe: [http://www.rafamet.com/oferta\\_frezarka\\_hsm.php](http://www.rafamet.com/oferta_frezarka_hsm.php) z dnia 25.01.2012.

#### METHOD FOR STATIC STIFFNESS DETERMINATION OF HEAVY MACHINE TOOLS IN THEIR OPERATING ENVIRONMENT

The article elaborates on a specific nature of research dealing with static properties of heavy machine tools in their operating environment. It presents issues related to the research itself as well as to ways to run measurements analysis, and possible interpretation of the results. The article describes experience of faculty members of the Machine Technology Department acquired during their scientific research on heavy machine tools of various engineering designs.