

Janusz ŚLIWKA¹

SZTYWNOŚĆ STATYCZNA SERWONAPĘDÓW OBRABIAREK

Zarówno sztywność statyczna jak i dynamiczna są najważniejszymi cechami wpływającymi na dokładność pracy obrabiarek. Podczas gdy sztywność w tradycyjnych obrabiarkach zależy wyłącznie od właściwości mechanicznych, w obrabiarkach CNC sztywność zależy również od właściwości systemu sterowania. Przy użyciu tradycyjnej metody określania statycznych współczynników sztywności, nie stwierdzono istotnych różnic między tradycyjnymi i nowoczesnymi obrabiarkami CNC. Jednak, w przypadku zastosowania metody wykorzystującej siłę dynamicznie zmienną o niskiej częstotliwości (metoda DWSS), pojawiły się pewne istotne różnice w uzyskanych wartościach wskaźników sztywności statycznej.

1. WPROWADZENIE

Eksperymentalne wyznaczanie wskaźników sztywności statycznej jest najbardziej popularną metodą oceny sztywności statycznej obrabiarek. W przypadku tradycyjnych badań polegających na symulowaniu statycznych obciążeń siłami skrawania o sztywności decydują jedynie mechaniczne właściwości obrabiarki. W Katedrze Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej w Gliwicach opracowano metodę pomiaru sztywności statycznej bazującej na obciążeniu dynamicznie zmiennym (metoda DWSS) [1]. Wyniki pomiarów sztywności statycznej metodą DWSS mogą być uwarunkowane nie tylko właściwościami mechanicznymi układu nośnego obrabiarki, ale również właściwościami serwonapędu, jeżeli bierze on udział w przejmowaniu obciążeń.

Znajomość wskaźnika sztywności statycznej wzdłużnej serwonapędu odgrywa znaczącą rolę w konstruowaniu tego typu napędu. Sztywność statyczna ma duży wpływ na częstotliwość rezonansową oraz strefę nieczułości serwonapędu [3]. Sztywność statyczną, a w konsekwencji częstotliwości rezonansowe, można wyznaczyć na drodze analitycznej, stosując np. metodę elementów skończonych. Niewątpliwie największą dokładność wyników można uzyskać, stosując metody doświadczalne. Spowodowane jest to trudnościami związanymi z modelowaniem części elektryczno-elektronicznej serwonapędu oraz sztywności stykowej [4].

¹ Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska w Gliwicach,
E-mail: janusz.sliwka@polsl.pl

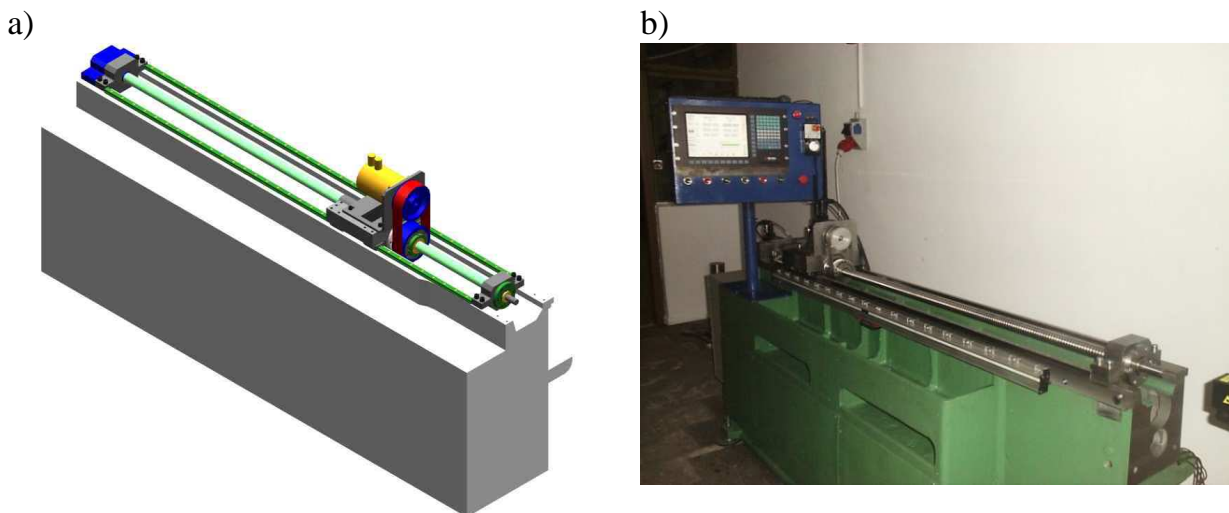
2. METODA DWSS

Metoda wyznaczania sztywności statycznej bazuje na powszechnie znanej równości przemieszczenia wywołanego siłą statyczną z amplitudą przemieszczenia wywołanego siłą zmienną harmoniczną, o amplitudzie równej wartości siły statycznej. Z taką równością przemieszczeń mamy do czynienia w przypadku, gdy częstotliwość siły wymuszającej jest znacznie mniejsza od pierwszej częstotliwości drgań własnych wymuszanego obiektu.

Metoda DWSS polega na pomiarze drgań wymuszonych siłą harmoniczną o częstotliwości małej w porównaniu z częstotliwością drgań własnych badanego obiektu. Do pomiaru drgań stosowane są sejsmiczne czujniki drgań. Sztywność statyczną oblicza się, jako stosunek amplitudy harmonicznej siły wymuszającej do amplitudy przemieszczenia wywołanego tą siłą (obliczonego z amplitudy przyspieszenia drgań mierzonego czujnikami sejsmicznymi). W omawianej metodzie zachodzi, zatem konieczność określenia wartości amplitud przemieszczeń na podstawie amplitud przyspieszeń drgań.

3. STANOWISKO BADAWCZE

Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku badawczym serwonapędów pokazanym na rys. 1.



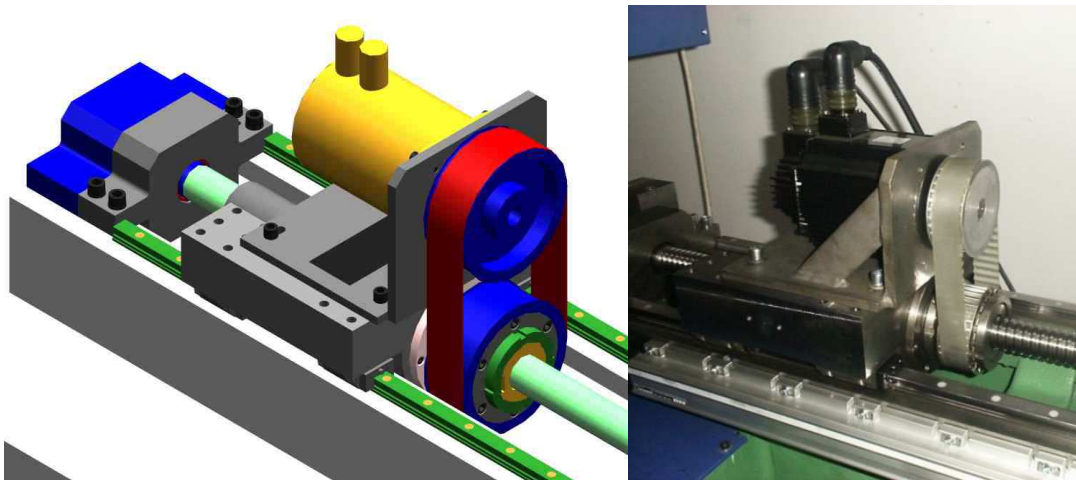
Rys. 1. Stanowisko do badania sztywności statycznej serwonapędów: a) model CAD; b) widok stanowiska [2]
Fig. 1. Investigation stand for studying static stiffness of servo-drives: a) CAD model; b) stand view [2]

Stanowisko to składa się z następujących podzespołów:

- żeliwnego łoża o długości $L=2300\text{mm}$,
- dwóch prowadnic tocznych INA KUVE 20 wraz z czterema wózkami,
- przekładni śrubowo-tocznej,

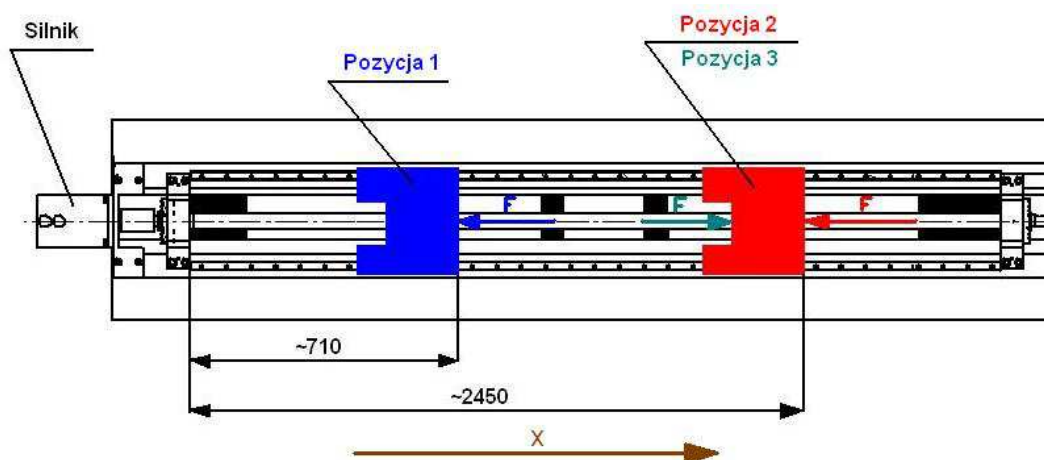
- dwóch serwonapędów firmy Yaskawa z silnikami Sigma SGMGH 13 DA i sterownikami SGDM-15DE,
- układu sterowania numerycznego CNC S-100T firmy SoftServo,
- liniału pomiarowego LS 176 firmy Heidenhain,
- zespołów opraw łożyskowych śruby tocznej.

Stanowisko badawcze zostało zbudowane w wersji dwuwariantowej, tj. w wersji z napędzaną nakrętką oraz w wersji z napędzaną śrubą pociągową. Stanowisko w konfiguracji z napędzaną nakrętką zostało pokazane na rys. 2.



Rys. 2. Wersja stanowiska z napędzaną nakrętką toczną: a) model CAD; b) widok stanowiska
Fig. 2. Variation of the stand with a propelled nut: a) CAD model; b) stand view

Badania sztywności statycznej serwonapędu przeprowadzono metodą konwencjonalną i metodą DWSS dla dwóch różnych położenia stołu względem silnika napędowego (tak jak to pokazano na rys. 3), dla czterech wartości współczynnika wzmocnienia prędkościowego K_v (5, 15, 30 i 45 1/s) oraz siły obciążającej z zakresu od 1 do 8kN.

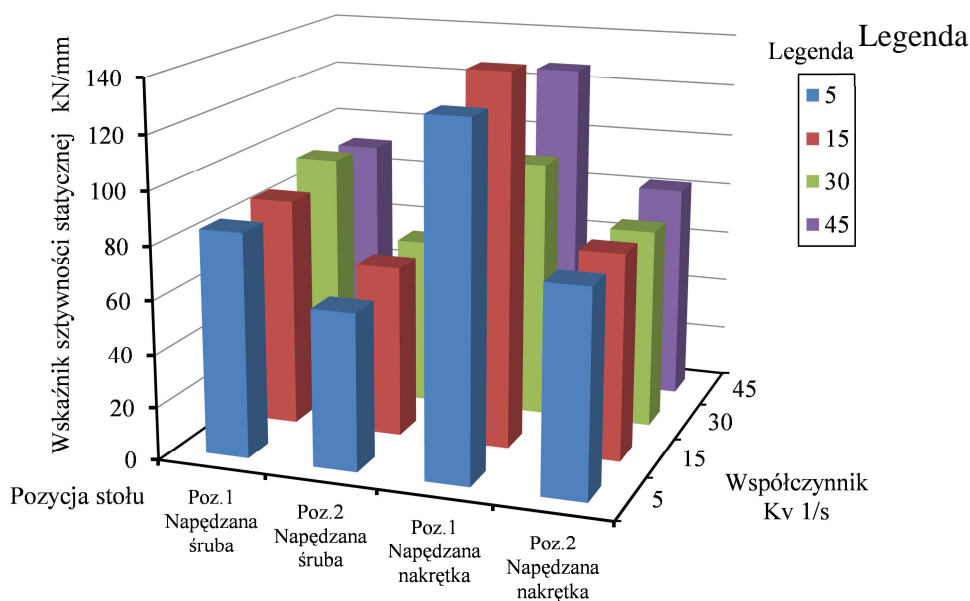


Rys. 3. Położenia stołu serwonapędu podczas badań sztywności
Fig. 3. Setting of the servo-drive table during stiffness investigation

W przypadku pomiarów metodą DWSS zastosowano siłę wymuszającą o częstotliwości z zakresu od 1 do 10Hz oraz dwa sposoby realizacji pętli sprzężenia zwrotnego położeniowego (w postaci enkodera obrotowego albo liniału pomiarowego). Testy przeprowadzono zarówno dla stanowiska z napędzaną śrubą, jak i stanowiska z napędzaną nakrętką.

4. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

Serwonapęd zawiera składniki mechaniczne (śruba, nakrętka, łożyska, prowadnice, przekładnie mechaniczne) i elektryczno-elektroniczne (silnik, sterownik silnika, układy pomiarowe drogi i prędkości, obwody regulacyjne drogi, prędkości, prądu), dlatego jego sztywność zależy od sztywności składników mechanicznych i elektryczno-elektronicznych. Sztywność serwonapędu bardzo istotnie zależy od rodzaju zastosowanego układu pomiaru przemieszczenia. Serwonapęd z bezpośrednim układem pomiarowym charakteryzuje się bardzo dużą sztywnością statyczną, tzn. trudną do praktycznego wyznaczenia metodami tradycyjnymi. Natomiast serwonapęd z układem pomiarowym pośrednim charakteryzuje się sztywnością wielokrotnie mniejszą i zależną od wielu różnych czynników. W przypadku serwonapędu z pośrednim układem pomiaru położenia, mierzoną wartością jest kątowe położenie wirnika silnika, a co za tym idzie nieuwzględniane są odkształcenia sprężyste i ciepłe części mechanicznej serwonapędu. Na rys. 4 pokazano wskaźniki sztywności serwonapędu wyznaczone metodą konwencjonalną. Jak można zauważyć, wskaźniki te zależą silnie od sposobu napędu oraz czynnej długości śruby tocznej (pozycji suportu), a mniej zależą od wartości współczynnika wzmocnienia prędkościowego K_v .



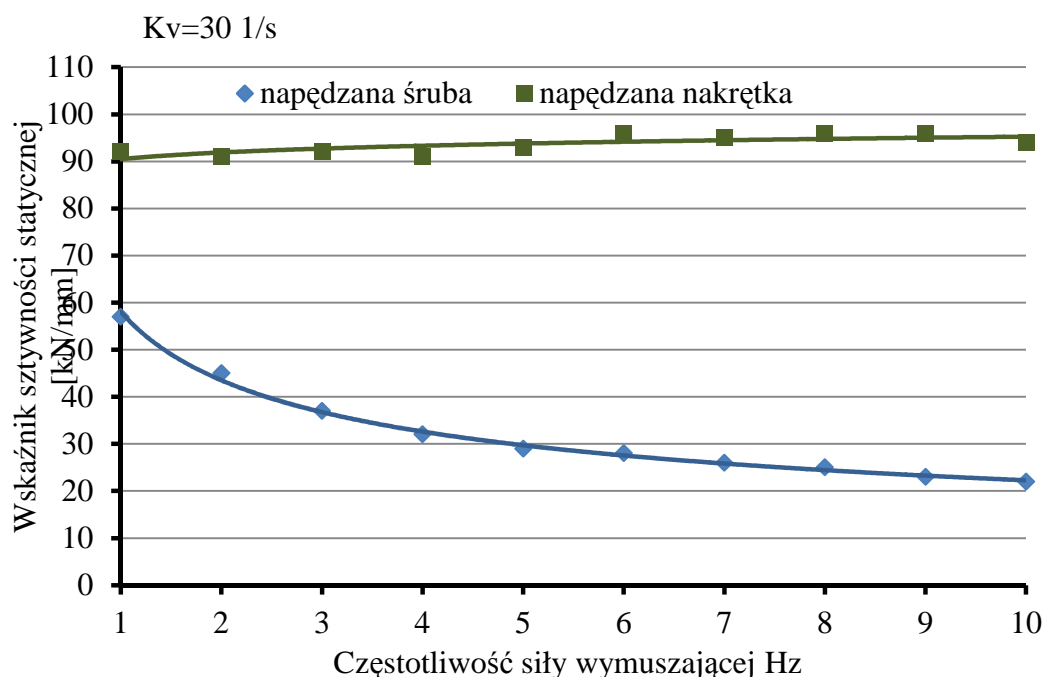
Rys. 4. Wskaźniki sztywności serwonapędu wyznaczone metodą konwencjonalną
Fig. 4. Stiffness factor of the servo-drive determined by conventional method

Sztywności serwonapędu wyznaczone metodą konwencjonalną i metodą DWSS różnią się znacząco i, co jest istotne w przypadku metody DWSS, sztywność ta nie jest stała i zależy od:

- sposobu napędu, tj. czy napędzana jest śruba toczna czy nakrętka toczna,
- parametrów mechanicznych (położenie nakrętki względem silnika, które definiuje długość śruby biorącej udział w przeniesieniu obciążenia) i parametrów elektryczno-elektronicznych (przede wszystkim współczynnika wzmocnienia prędkościowego K_v),
- częstotliwości, amplitudy i składowej stałej siły wymuszającej.

Ważniejsze szczegółowe spostrzeżenia, jakie poczyniono odnośnie sztywności statycznej serwonapędów z pośrednimi układami pomiarowymi położenia, zamieszczono poniżej. Uwagi te dotyczą sztywności statycznej wyznaczonej metodą DWSS.

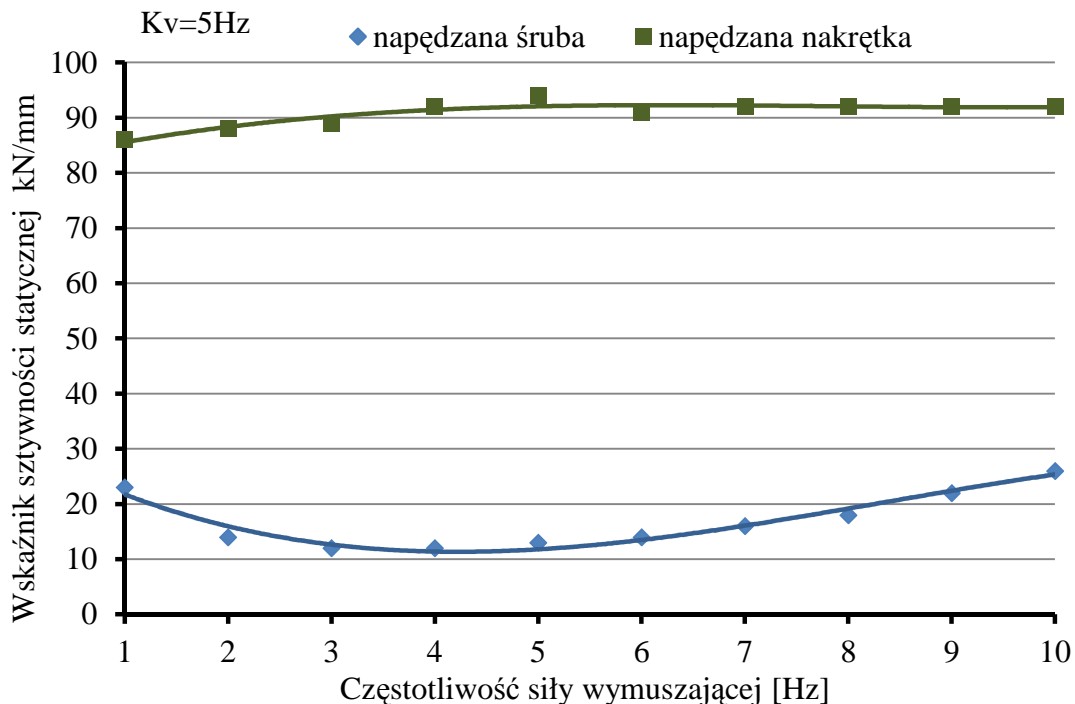
1. Sztywność serwonapędu z napędzaną śrubą toczną różni się istotnie od sztywności serwonapędu z napędzaną nakrętką toczną. Sztywność serwonapędu z napędzaną nakrętką toczną jest znacząco większa od sztywności serwonapędu z napędzaną śrubą toczną. Na rys. 5 pokazano wpływ sposobu napędzania serwonapędu oraz częstotliwości siły wymuszającej na wielkość wskaźnika sztywności statycznej dla współczynnika wzmocnienia prędkościowego K_v , wynoszącego 30 1/s. Na przedstawionych w tym rozdziale wykresach, ilustrujących wskaźniki sztywności serwonapędu, punktami oznaczono uzyskane wyniki pomiarów oraz, w celu lepszego zobrazowania zależności od częstotliwości siły wymuszającej, dodano linię trendu.



Rys. 5. Wpływ sposobu napędu i częstotliwości siły wymuszającej na sztywność serwonapędu wyznaczaną metodą DWSS, dla $K_v=30$ 1/s

Fig. 5. The influence of the drive mode and frequency of the exciting force on servo-drive stiffness as determined by DDSS method, for $K_v=30$ 1/s

Na kolejnym rysunku (rys. 6) przedstawiono zależność wskaźnika sztywności od sposobu napędu oraz częstotliwości siły wymuszającej dla współczynnika wzmocnienia prędkościowego K_v , wynoszącego 5 1/s.



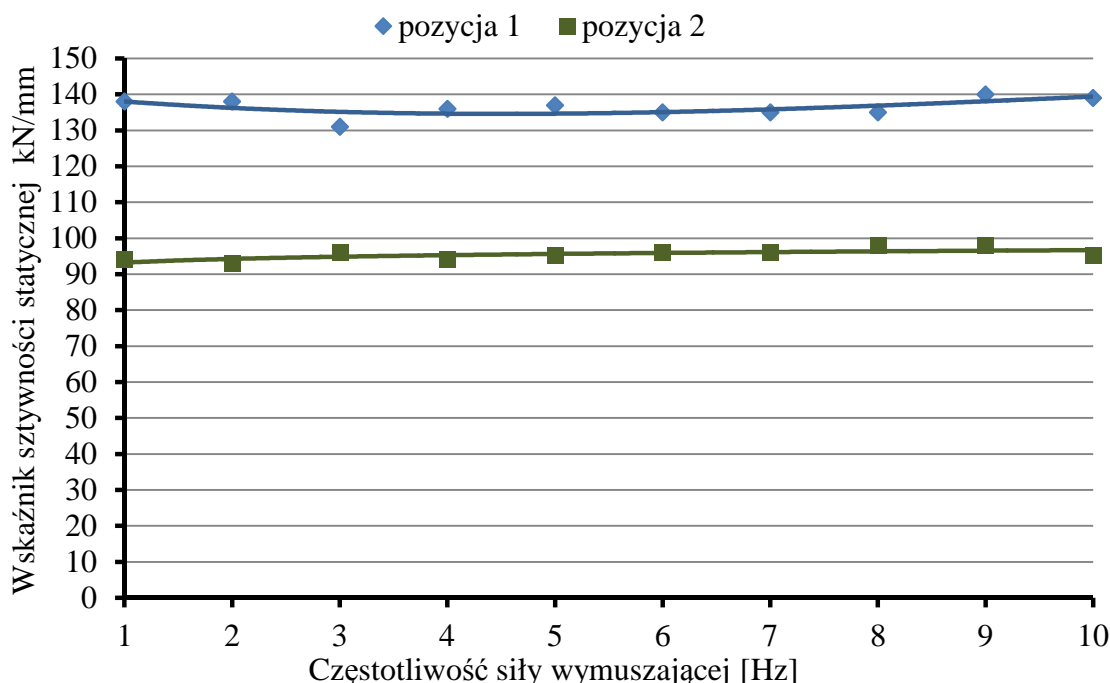
Rys. 6. Wpływ sposobu napędu i częstotliwości siły wymuszającej na sztywność serwonapędu wyznaczaną metodą DWSS, dla $K_v=5$ 1/s

Fig. 6. The influence of the drive mode and frequency of the exciting force on servo-drive stiffness as determined by DDSS method, for $K_v=5$ 1/s

Zależność wskaźnika sztywności od sposobu napędu (napędzana śruba lub napędzana nakrętka), widoczna na rys. 5 i rys. 6 spowodowana jest przede wszystkim wpływem bezwładności śruby tocznej. W przypadku napędu śruby tocznej jej znacząco większa bezwładność (w porównaniu z bezwładnością nakrętki) utrudnia układowi napędowemu utrzymanie zadanej pozycji (szczególnie w przypadku działania siły dynamicznie zmiennej), co w konsekwencji powoduje spadek sztywności. To samo zjawisko jest przyczyną tego, że w przypadku napędzanej śruby tocznej występuje widoczna zależność wskaźnika sztywności od częstotliwości siły wymuszającej, a w przypadku napędzanej nakrętki zależności takiej nie można zauważyć.

2. Sztywność serwonapędu jest wielkością zależną od parametrów mechanicznych i elektrycznych. W pierwszym rzędzie sztywność ta zmienia się z położeniem nakrętki względem silnika serwonapędu. W miarę oddalania się nakrętki od silnika sztywność maleje istotnie, co pokazane zostało na kolejnym rysunku (rys. 7). Zmiana ta spowodowana jest zwiększeniem czynnej długości śruby tocznej. Skutkiem działania siły wzdłużnej jest powstanie odkształceń sprężystych śruby, prowadzących do jej skrócenia lub wydłużenia. Powstałe odkształcenia sprężyste są proporcjonalne do czynnej długości

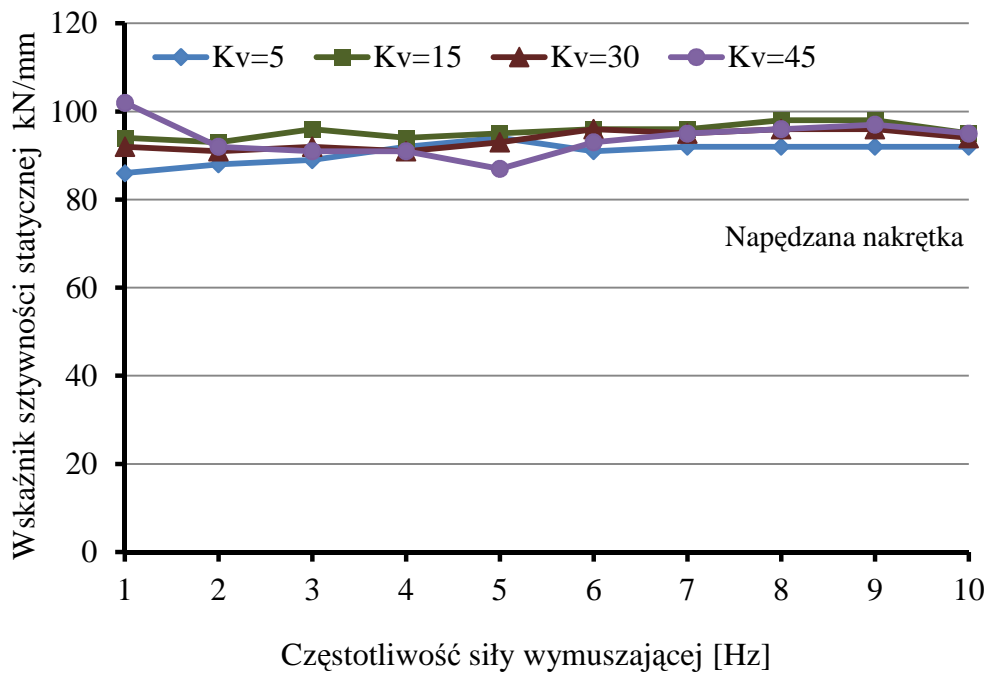
śruby. Zależność ta jest widoczna zarówno w konfiguracji serwonapędu z napędzaną śrubą, jak i w konfiguracji z napędzaną nakrętką.



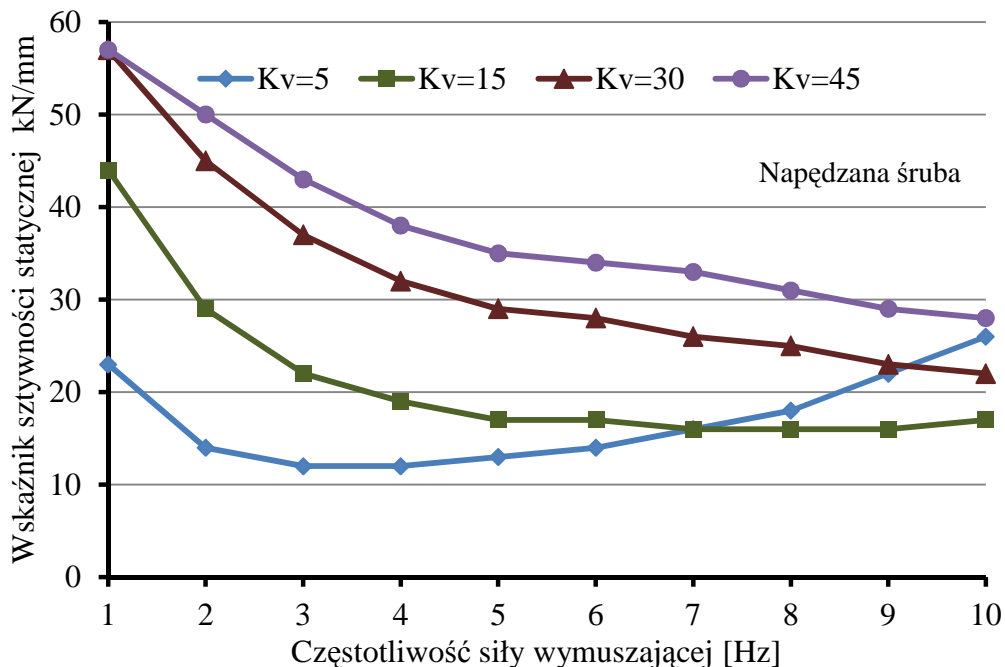
Rys. 7. Wpływ czynnej długości śruby tocznej oraz częstotliwości siły wymuszającej na wartość wskaźników sztywności serwonapędu w konfiguracji z napędzaną nakrętką

Fig. 7. The influence of virtue length of the nut and the frequency of the exciting force on values of stiffness factors of the servo-drive for the configuration including propelled nut

3. Jak można zauważyć na rys. 8 i rys. 9, dla badanego zakresu zmienności K_v od 5 do 45 1/s wskaźnik sztywności statycznej w różnym stopniu zależy od współczynnika wzmocnienia prędkościowego K_v . Dla serwonapędu w konfiguracji z napędzaną nakrętką (rys. 8) sztywność wyznaczana dla różnych wartości współczynnika K_v różniła się nieznacznie, maksymalnie o ok. 10%. Dla serwonapędu w konfiguracji z napędzaną śrubą (rys. 9) widać, że wzrost współczynnika K_v prowadził do wzrostu sztywności. Fakt ten pozwala wnioskować, że wzrost wartości współczynnika K_v powoduje wzrost odporności serwonapędu na oddziaływanie sił statycznych i dynamicznych. Obserwowana zależność jest zjawiskiem oczekiwanym, ponieważ dla tej samej wartości uchybu położeniowego ε , ale dla większej wartości K_v , prędkość zmniejszania uchybu będzie większa, a co za tym idzie sztywność serwonapędu wzrośnie. Zjawisko to jest dobrze widoczne w przypadku napędzanej śruby, a praktycznie niezauważalne w przypadku napędzanej nakrętki, z powodów omówionych w punkcie 1. Należy również zauważyć, że zwiększanie wartości współczynnika wzmocnienia prędkościowego nie może być łatwym sposobem na zwiększanie sztywności serwonapędu, z uwagi na niebezpieczeństwo utraty stabilności.

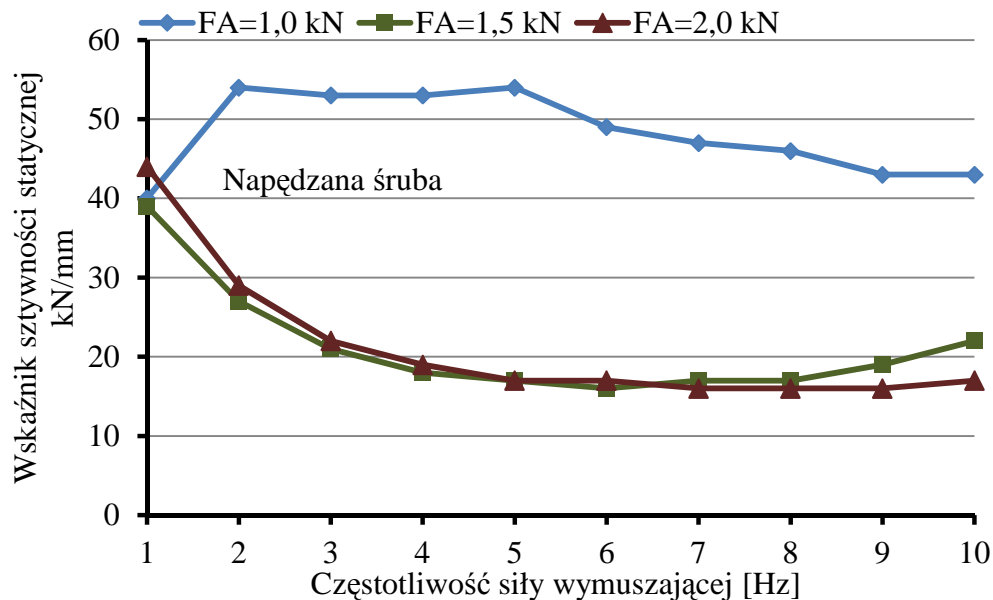


Rys. 8. Zależność współczynnika sztywności statycznej serwonapędu od częstotliwości siły wymuszającej dla różnych wartości współczynnika wzmocnienia prędkościowego K_v w serwonapędzie z napędzaną nakrętką
 Fig. 8. Dependence of the static stiffness coefficient of the servo-drive on the frequency of the exciting force for various values of velocity amplification coefficient K_v for servomotor with driven nut



Rys. 9. Zależność współczynnika sztywności statycznej serwonapędu od częstotliwości siły wymuszającej dla różnych wartości współczynnika wzmocnienia prędkościowego K_v w serwonapędzie z napędzaną śrubą
 Fig. 9. Dependence of static stiffness coefficient of the servo-drive on the frequency of the exciting force for various values of velocity amplification coefficient K_v servomotor with driven nut

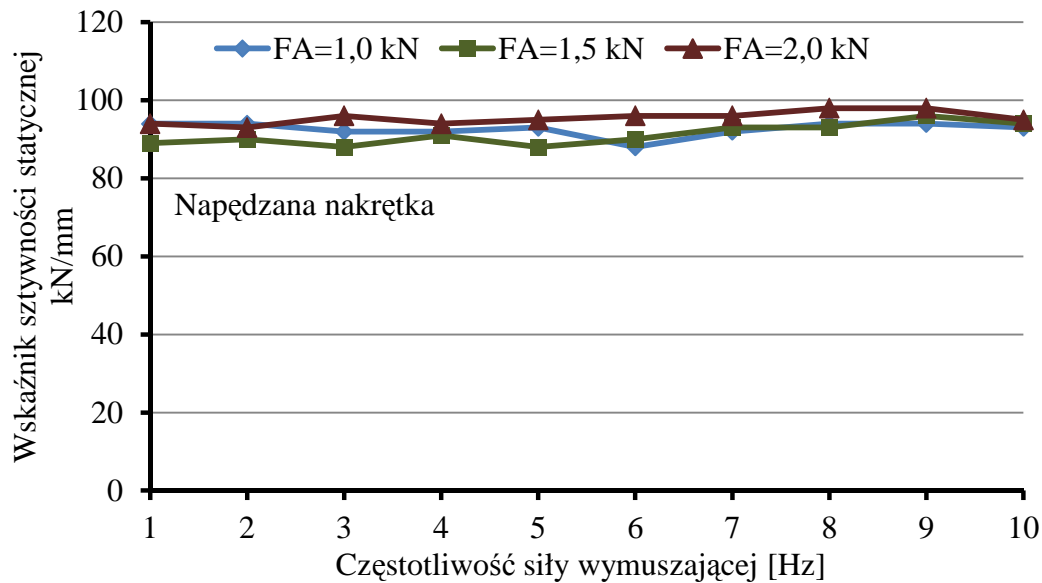
4. Wpływ częstotliwości siły wymuszającej na sztywność serwonapędu jest znaczący, ale niejednoznaczny. Na ogół jest tak, że dla niskich częstotliwości siły wymuszającej sztywność jest wyższa niż dla częstotliwości wyższych, co widać przykładowo na rys. 5 i rys. 9. Przy czym w niektórych przypadkach można zaobserwować występowanie ekstremum (minimum) sztywności (dotyczy to układu z napędzaną śrubą toczną i odległych położen nakrętki względem silnika). Przykładowo (patrz rys. 6 i rys. 9), dla skrajnego położenia nakrętki względem silnika sztywność minimalna występowała dla częstotliwości wymuszeń ok. $3 \div 5$ Hz (w zależności od K_v) i różniła się od największej nawet o 100%. W miarę jak położenie nakrętki było bliższe silnika serwonapędu, wpływ częstotliwości wymuszenia malał, tzn. obserwuje się coraz mniejsze zmiany wraz ze zmianą częstotliwości. Dla środkowego położenia nakrętki względem silnika (dotyczy badanego stanowiska) wpływ zmian częstotliwości nie przekraczał $10 \div 20\%$.
5. Takiego wpływu częstotliwości wymuszenia na sztywność serwonapędu nie obserwuje się dla układu z napędzaną nakrętką, co widać na rys. 6 i rys. 7. Dla skrajnego położenia nakrętki względem silnika zmiana częstotliwości siły w zakresie $1 \div 10$ Hz powodowała zmiany sztywności nieprzekraczające 10%. Można więc uznać, że w tym przypadku częstotliwość siły wymuszającej nie ma wpływu na sztywność serwonapędu.
6. Znaczący wpływ na sztywność serwonapędu wywiera amplituda siły wymuszającej, przy czym obserwuje się następujące prawidłowości charakterystyczne dla układu z napędzaną śrubą toczną. Po pierwsze, jeżeli amplituda siły wymuszającej jest mała, tj. rzędu 20% wartości składowej stałej, to sztywność radykalnie wzrasta. Po drugie, jeżeli amplituda siły wymuszającej jest stosunkowo duża, tj. rzędu 50% wartości składowej stałej, to sztywność osi OSN maleje. Różnice sztywności mogą sięgać 100% (dotyczy to małych wartości K_v). W miarę wzrostu K_v wpływ amplitudy jest malejący.



Rys. 10. Zależność współczynnika sztywności statycznej serwonapędu od amplitudy siły wymuszającej w serwonapędzie z napędzaną śrubą (FA – amplituda siły wymuszającej)

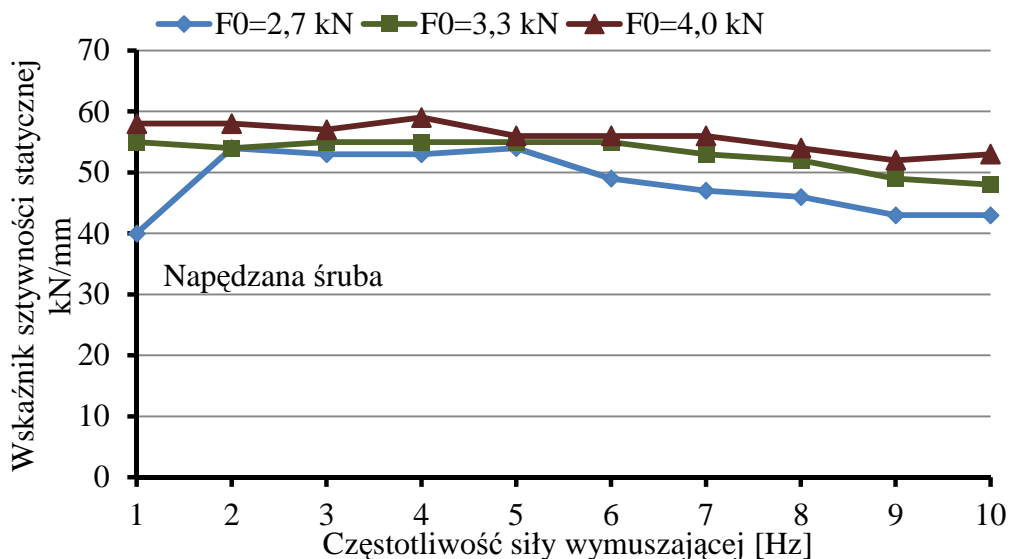
Fig. 10. Dependence of static stiffness coefficient of the servo-drive on the amplitude of the exciting force for the servo-drive propelled by a bolt (FA – amplitude of the exciting force)

7. W przypadku układu napędowego z napędzaną nakrętką nie obserwuje się znaczącego wpływu amplitudy siły wymuszającej na sztywność serwonapędu. Różnice sztywności z tytułu zwiększenia amplitudy siły z 20% do 50% wartości składowej stałej siły mieszczą się w granicach błędu pomiaru. Wykres ilustrujący to zjawisko pokazano na rys. 11.



Rys. 11. Zależność współczynnika sztywności statycznej serwonapędu od amplitudy siły wymuszającej w serwonapędzie z napędzaną nakrętką

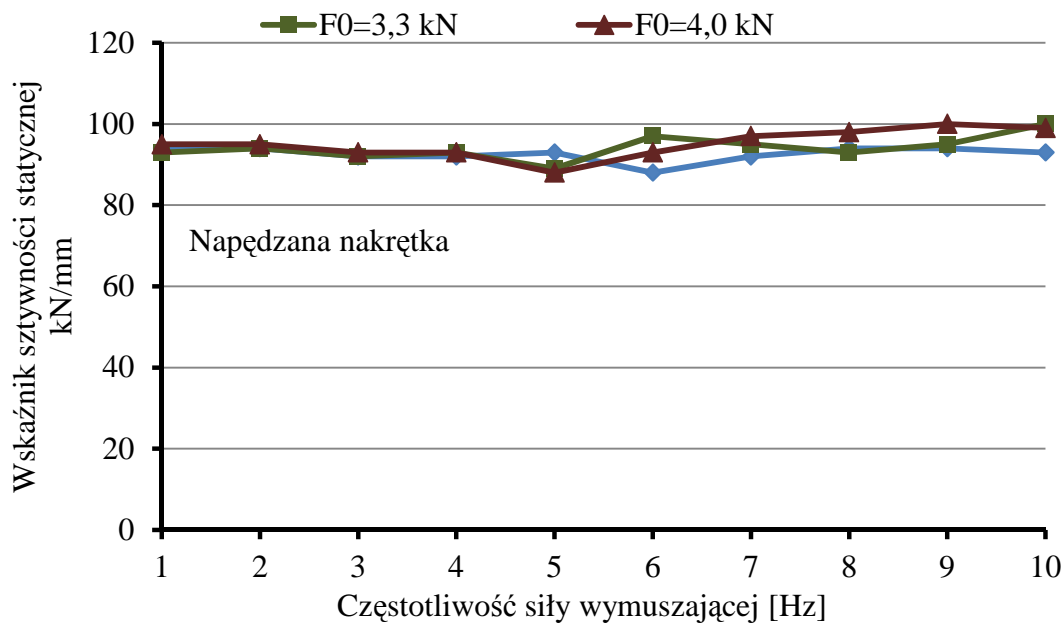
Fig. 11. Dependence of static stiffness coefficient of the servo-drive on the amplitude of the exciting force for the servo-drive propelled by a nut



Rys. 12. Zależność współczynnika sztywności statycznej serwonapędu od składowej stałej siły wymuszającej w serwonapędzie z napędzaną śrubą (F_0 – składowa stała siły)

Fig. 12. Dependence of the static stiffness coefficient of the servo-drive on a component constant exciting force for the servo-drive propelled by a bolt (F_0 – the constant force)

8. Na sztywność serwonapędu wpływ ma także składowa stała siły wymuszającej. Jest to szczególnie widoczne w przypadku układu z napędzaną śrubą toczną. W badaniach realizowano przypadki, dla których składowa stała siły wymuszającej różniła się nawet o 100%. Z tego tytułu obserwowano zmianę sztywności (na ogół wzrost) rzędu 10÷25%, co widać na rys. 12.
9. W przypadku układu z napędzaną nakrętką wpływ składowej stałej na sztywność był wyraźnie słabszy (kilkuprocentowy) i, co istotne, nie tak regularny jak w przypadku wpływu amplitudy (tzn. wzrost składowej stałej nie zawsze prowadził do wzrostu sztywności).

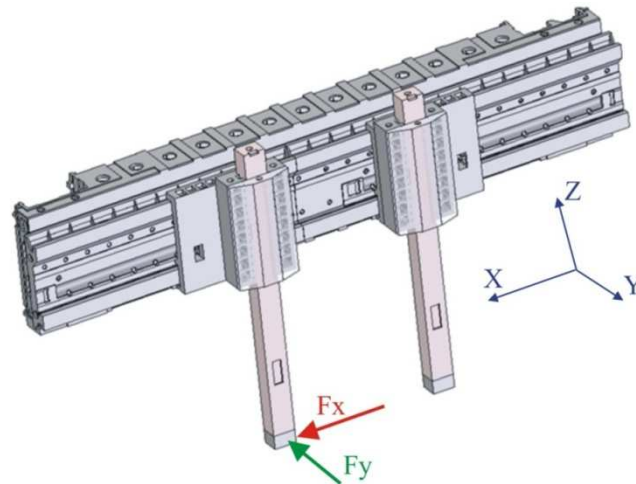


Rys. 13. Zależność współczynnika sztywności statycznej serwonapędu od składowej stałej siły wymuszającej | w serwonapędzie z napędzaną nakrętką

Fig. 13. Dependence of the static stiffness coefficient of the servo-drive on a component constant exciting force for the servo-drive propelled by a nut

Wpływ właściwości serwonapędu na wyznaczone wskaźniki sztywności zauważalny jest podczas badań obrabiarek ciężkich. Na rys. 14 zobrazowano dwa podstawowe kierunki działania obciążeń podczas badań sztywności. Obciążenie działające w kierunku osi X przenoszone jest przez serwonapęd suportu. Obciążenie działające w kierunku osi Y dociska suport do belki suportowej, w tym przypadku serwonapęd nie przenosi żadnych obciążeń. Należy zaznaczyć, że w przypadku obróbki bez wykorzystania posuwu w osi X istnieje możliwość pracy obrabiarki z zakleszczonym hydraulicznie suportem, co powoduje naturalne odciążenie serwonapędu.

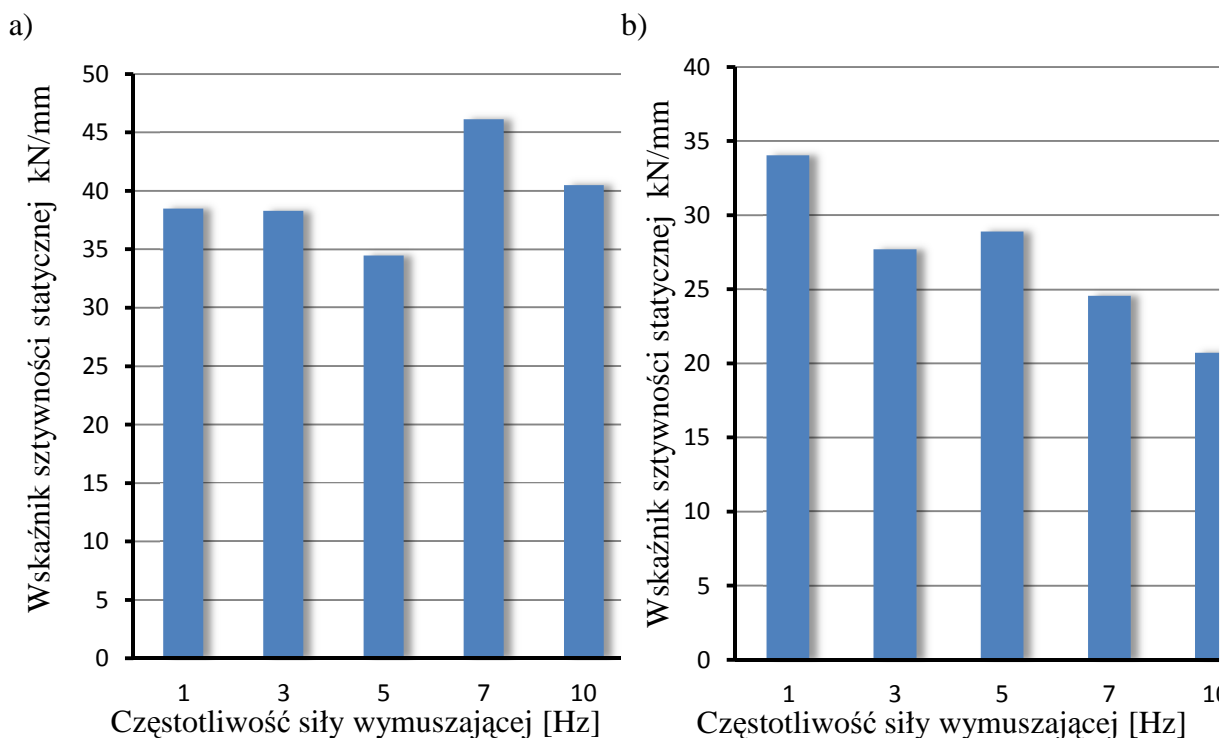
Przykładowo, na rys. 15a pokazano zależność wskaźnika sztywności j_{yy} tokarskiego centrum obróbczego od częstotliwości siły wymuszającej podczas badań metodą DWSS. Dla uzyskanych wyników nie można wskazać wyraźnego trendu pomiędzy wyznaczonymi wskaźnikami a częstotliwością siły wymuszającej.



Rys. 14. Kierunki działania obciążeń podczas wyznaczania wskaźników sztywności statycznej tokarskiego centrum karuzelowego

Fig. 14. Directions of load performance during determination of static stiffness of a vertical machining center unit

Na rys. 15b zestawiono wskaźniki sztywności j_{xx} uzyskane w przypadku, kiedy to serwonapęd przejmuje obciążenie. Widoczna jest wyraźna zależność uzyskanych wartości wskaźników sztywności od częstotliwości siły wymuszającej. Zwiększanie częstotliwości siły powoduje spadek wskaźnika sztywności.



Rys. 15. Zależność wskaźników sztywności suwaka tokarskiego centrum obróbczego KDC od częstotliwości siły wymuszającej podczas badań metodą DWSS: a) wskaźnik sztywności j_{yy} , b) wskaźnik sztywności j_{xx}

Fig. 15. Dependency of stiffness factors of the slider in a machining center KDC on the frequency of the exciting force during DDSS investigation: a) stiffness factor j_{yy} , b) stiffness factor j_{xx}

Dla pokazanego przypadku różnica pomiędzy wskaźnikiem sztywności wyznaczonym dla częstotliwości siły wymuszającej 1Hz a wskaźnikiem wyznaczonym dla 10Hz wynosi około 40%.

5. PODSUMOWANIE

Porównując sztywność serwonapędu wyznaczoną metodą konwencjonalną i metodą DWSS, nasuwają się następujące uogólnienia:

1. Sztywności te różnią się jakościowo i ilościowo, tzn. sztywność wyznaczona metodą DWSS nie jest wielkością stałą, ale istotnie zmienia się z częstotliwością, amplitudą i składową stałą siły wymuszającej, współczynnikiem K_v czy sposobem napędu (napęd śruby tocznej lub nakrętki tocznej), podczas gdy sztywność wyznaczona metodą konwencjonalną jest wielkością w przybliżeniu stałą (zależy jedynie istotnie od sposobu napędu).
2. Sztywność wyznaczona metodą DWSS, w przypadku napędu śruby tocznej, jest na ogół mniejsza od sztywności wyznaczonej metodą konwencjonalną. W zależności od częstotliwości, amplitudy, składowej stałej siły wymuszającej oraz współczynnika K_v , współczynniki sztywności mogą różnić się nawet do 2÷4 razy.
3. W przypadku napędzanej nakrętki tocznej występuje zasadniczo inna sytuacja. Sztywność serwonapędu wyznaczona metodą DWSS jest albo na poziomie sztywności wyznaczonej metodą konwencjonalną, albo o kilka procent wyższa. Taka sytuacja ma miejsce niezależnie od częstotliwości, amplitudy składowej stałej siły wymuszającej czy współczynnika K_v .
4. Z uwagi na dynamiczny charakter sił skrawania można stwierdzić, że wyniki uzyskane metodą DWSS lepiej odzwierciedlają wpływ sztywności statycznej serwonapędu posuwu na rzeczywistą dokładność obrabiarki sterowanej numerycznie, niż ma to miejsce w przypadku wyników uzyskanych metodą konwencjonalną.

Wyniki prezentowane w tej części pracy są wycinkiem badań realizowanych w Katedrze Budowy Maszyn w ramach projektu badawczego pt. „Wyznaczanie sztywności statycznej obrabiarek sterowanych numerycznie metodą dynamiczną”, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych. W raporcie z tego projektu [2] znaleźć można pełne opisy przeprowadzonych badań. Prezentowane wyniki będą wykorzystane w pracach mających na celu stworzenie pełnego modelu matematycznego serwonapędu obejmującego swym zakresem zarówno część mechaniczną, jak i część elektryczno-elektroniczną.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego nr 5 T07D 002 23 finansowanego przez KBN.

LITERATURA

- [1] ŚLIWKA J., 2000, *Wyznaczanie sztywności statycznej obrabiarek metodą wymuszenia dynamicznego*, Zeszyty Naukowe Katedry Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej, 2, Gliwice.
- [2] Praca zbiorowa, 2005, *Wyznaczanie sztywności statycznej obrabiarek sterowanych numerycznie metodą dynamiczną*, Projekt badawczy KBN nr 5 T07D 002 23, Gliwice.

-
- [3] KOSMOL J., 1998, *Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie*, WNT, Warszawa.
- [4] GRZYWOCZ J., SOKOŁOWSKI A., 2013, *Badania sztywności statycznej obrabiarki KCI 210/280 NM w konwencji hybrydowej metody elementów skończonych*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej, 2, Gliwice.

STATIC STIFFNESS OF MACHINE TOOLS SERVO DRIVES

Both static and dynamic types of stiffness are the key features influencing the accuracy of a machine tool performance. Whereas the stiffness of a traditional machine tool depends solely on the mechanic system used, the CNC machine tool stiffness is determined not only by its mechanic system but by the control system as well. Using the traditional method for determining static stiffness factors, no significant differences were observed between traditional and modern CNC machine tools. However, having applied the method using dynamically variable force of low frequency (DDSS method), some essential discrepancies appeared in the static stiffness factors obtained.

Keywords: *static stiffness, machine tool, servo drive*