

Oleg Draczew¹, Antoni Świć², Wiktor Taranenko²

STEROWANIE UKŁADEM DYNAMICZNYM OBRÓBK CZĘŚCI OSIOWOSYMETRYCZNYCH O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Streszczenie. Uzasadniono i sprawdzono dostrojenie układu dynamicznego umożliwiające zwiększenie dokładności i wydajności obróbki. Analizowany jest układ sterowania automatycznego procesami dynamicznymi układu technologicznego z obwodem (konturem) dodatkowym.

Słowa kluczowe: sterowanie, układ dynamiczny, obróbka, część o małej sztywności

WSTĘP

Zwiększenie dokładności obróbki wałów o małej sztywności nie jest możliwe bez sterowania procesami obróbki toczeniem. Na charakterystyki dynamiczne procesu obróbki wpływają różnorodne, zmienne w czasie, czynniki technologiczne. Należy, więc zagwarantować stałość charakterystyk dynamicznych procesu skrawania drogą sterowania drganiami układu technologicznego.

Procesy dynamiczne układu sprężystego obrabiarki uwarunkowane są oddziaływaniami siłowymi na układ w procesie skrawania.

MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU DYNAMICZNEGO OBRÓBK CZĘŚCI

Równania opisujące zachowanie układu, z uwzględnieniem opóźnienia siły od przemieszczeń oraz przemieszczeń podukładu technologicznego (narzędzia lub półfabrykatu) w płaszczyźnie skrawania stycznej do powierzchni obrabianej, mają postać [1, 3, 4]:

¹ Państwowy Uniwersytet Techniczny w Togliatti, Rosja,

² Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych, Politechnika Lubelska.

$$\begin{aligned}
T_{1Y}^2 y'' + T_{2Y} y' + y &= g_Y \cdot F_Y, \\
T_{3Z}^2 z'' + T_{4Z} z' + z &= g_Z \cdot F_Z, \\
F_Z + T_Z F'_Z &= m_Z \cdot y + n_Z \cdot f + h_1 z', \\
F_Y + T_Y F'_Y &= m_Y \cdot y + n_Y \cdot f + h_2 z', \\
f &= K_K \cdot z,
\end{aligned} \tag{1}$$

gdzie: h_1, h_2 - współczynniki tłumienia względem osi z i y drgań stycznych, odpowiednio dla stycznej F_Z i promieniowej F_Y składowej siły skrawania;

T_Z, T_Y - opóźnienia stałe składowych siły skrawania spowodowane zmianą parametrów przekroju warstwy;

$T_{1,2,Y}, T_{1,2,Z}$ - stała czasowa inercyjna oraz stała czasowa tłumienia obwodów normalnego i stycznego;

y, z - przemieszczenia względem odpowiednich osi;

m_Z, n_Z, m_Y, n_Y - współczynniki wzmocnienia procesu skrawania odnośnie przyrostu szerokości i grubości warstwy skrawanej odpowiednio dla składowych siły skrawania F_Z i F_Y ;

K_K - współczynnik przekształcenia przemieszczeń stycznych we wzdlużne;

f - zmiana grubości warstwy skrawanej;

g_Y, g_Z - podatności obwodów normalnego i stycznego.

Wartości współczynników do obliczeń siły skrawania przyjęto z literatury [2, 5, 7]. Do określenia stałych opóźnienia siły skrawania spowodowanego zmianą grubości warstwy skrawanej, długość drogi skrawania w przypadku składowej stycznej przyjęto równą 0,12 mm, a składowej normalnej 0,51 mm. Stała opóźnienia składowej siły skrawania F_Z dla różnych materiałów półfabrykatu jest mniejsza od 2 do 5 razy od F_Y [2, 7]. W przypadku elementów układu technologicznego o dodatkowym stopniu swobody zakłócenie odkształceń początkowo ma miejsce w płaszczyźnie stycznej do powierzchni skrawania, a następnie w normalnej. Wpływ przemieszczenia na dokładność w kierunku stycznej siły skrawania jest o rząd mniejszy, niż w kierunku promieniowej. Generowanie drgań w kierunku promieniowym sprzyja redystrybucji energii zakłóceń i jej rozpraszaniu przy drganiach. Dlatego przy określaniu sił skrawania należy uwzględnić tłumienie, chociaż drgania przy skrawaniu generowane są w zakresie od 150 do 500 Hz.

Do obliczeń stałych czasowych układu technologicznego zastosowano dane eksperymentalne (współczynniki tłumienia, sztywności, masa zredukowana), uzyskane przy pomiarze drgań swobodnych gasnących.

Sztywność układu dynamicznego w kierunku stycznym przy wprowadzeniu przekształtnika zmniejszyła się od 2 do 4 razy.

Z układu równań (1) otrzymano transmitancje układu dynamicznego:

$$G_1(s) = \frac{y}{F_y} = \frac{g_Y}{T_{1Y}^2 s^2 + T_{2Y}s + 1}, \quad G_2(s) = \frac{z}{F_Z} = \frac{g_Z}{T_{3Z}^2 s^2 + T_{4Z}s + 1},$$

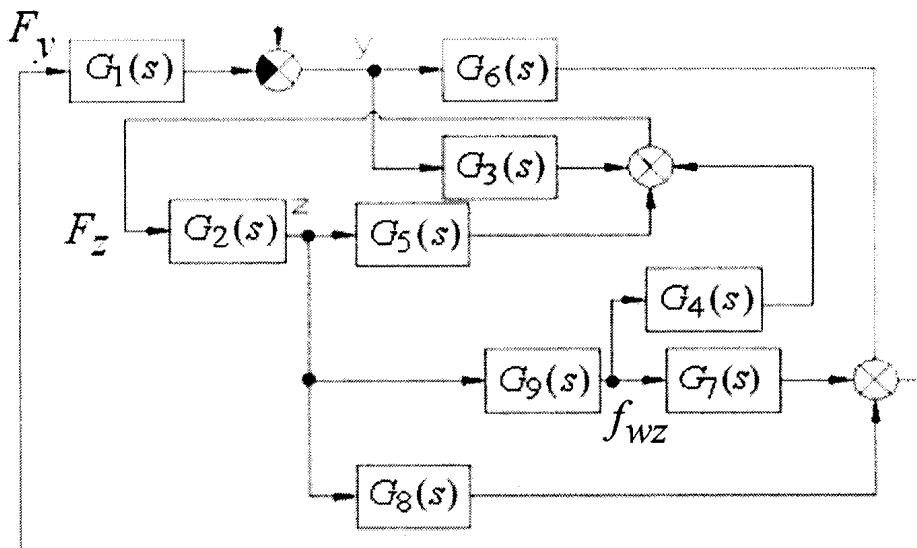
$$G_3(s) = \frac{F_Z}{y} = \frac{m_Z}{1 + T_Z s}, \quad G_4(s) = \frac{F_Z}{f} = \frac{n_Z}{1 + T_Z s}, \quad G_5(s) = \frac{F_Z}{z} = \frac{h_1 s}{1 + T_Z s},$$

$$G_6(s) = \frac{F_Y}{y} = \frac{m_Y}{1 + T_Y s}, \quad G_7(s) = \frac{F_Y}{f} = \frac{n_Y}{1 + T_Y s}, \quad G_8(s) = \frac{F_Y}{z} = \frac{h_2 s}{1 + T_Y s},$$

$$G_9(s) = \frac{f}{z} = K_K,$$

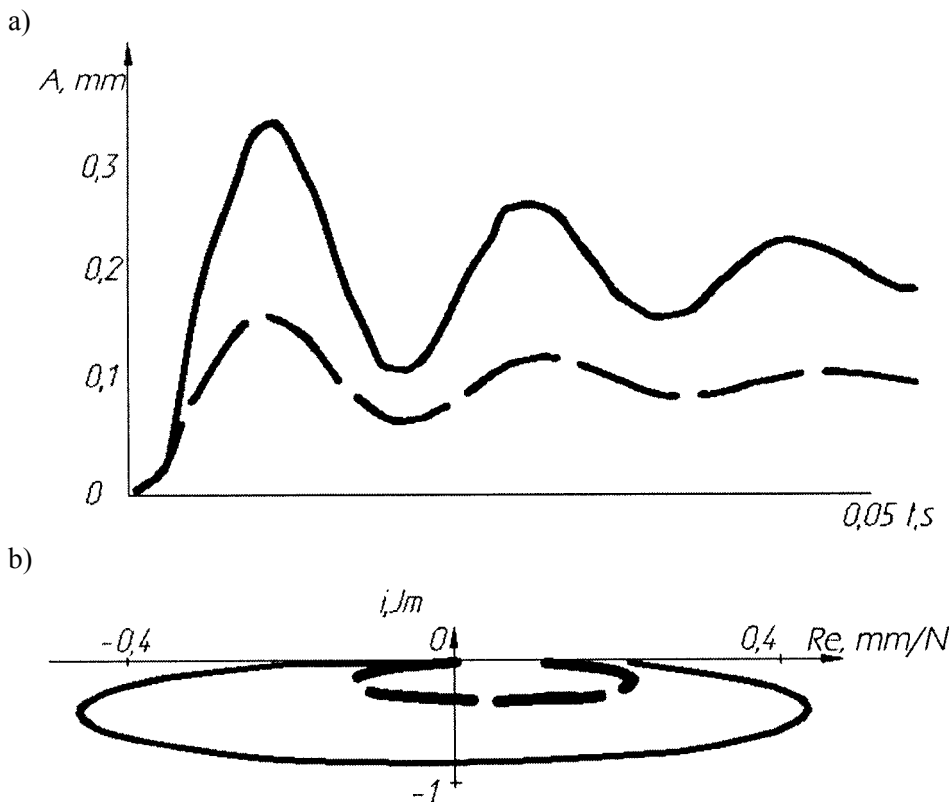
gdzie s – operator Laplace’a.

W oparciu o transmitancje operatorowe opracowano schemat strukturalny układu dynamicznego z obwodem stycznym (rys. 1).



Rys. 1. Schemat strukturalny układu dynamicznego z obwodem stycznym
 Fig. 1. The block diagram of dynamic system with contiguous circuit

Procesy przejściowe i amplitudowa charakterystyka fazowo-częstotliwościowa (ACHFC) otwartego układu dynamicznego, ze stycznym obwodem i bez, przedstawione są na rys. 2.



Rys. 2. Procesy przejściowe (a) i ACHFC (b) układów dynamicznych bez obwodu stycznego (—) i z obwodem stycznym (---)

Fig. 2. Transitory processes (a) and Attenuation Diagram of Transient-Frequency Response (b) without (—) and with the contiguous circuit (---)

Wprowadzenie dodatkowego stopnia swobody prowadzi do zwiększenia sztywności statycznej i dynamicznej w kierunku promieniowym a także zmniejszenia czasu niezbędnego do zanikania procesów przejściowych w układzie technologicznym przy działaniu zakłóceń.

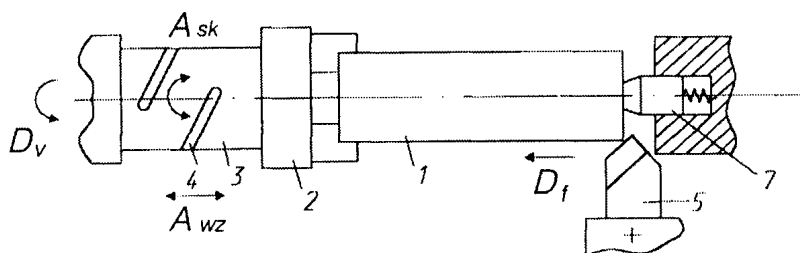
Dane eksperymentalne otrzymane przy toczeniu oraz roztaczaniu części o małej sztywności pokazały, że wprowadzenie obwodu stycznego zwiększa dokładność obróbki i zmniejsza chropowatość powierzchni. Przy toczeniu zastosowano urządzenia do generowania drgań, zarówno w podukładach kształtowania części „półfabrykat- podpory”, jak i „nóż- suport”.

We wszystkich przypadkach obserwowano zwiększenie dokładności wymiarów, lecz szczególnie należy odnotować znaczące zmniejszenie błędów położenia i kształtu obróbjonej powierzchni. Mikrozarys powierzchni był przy tym nierównomierny w zakresie długości części z powodu zmiennych warunków obróbki. Jednak w odróżnieniu od obróbki w takich samych warunkach przy zastosowaniu standardowego wyposażenia powierzchnia nie ma wklęsłości.

Do generowania drgań w podukładzie „półfabrykat - podpory” przy toczeniu zastosowano przemiennik falowodowy jako wiążący element między półfabrykatem i uchwytem. Przemiennik falowodowy wykonany jest w postaci pręta z przelotowym rowkiem śrubowym do wytworzenia drgań kompleksowych. W podukładzie „nóż-suport” zastosowano nóż z rowkami klinowymi, w które wstawiono kliny z możliwością regulowania siły ich zacisku. Do roztaczania również zastosowano przemiennik falowodowy umieszczony w koniku, wypełniający ponadto funkcje wytaczadła dla mocowania głowic wytaczarskich.

UKŁAD STEROWANIA STABILIZACJI PARAMETRÓW PROCESU OBRÓKI WIBRACYJNEJ

Opracowano układ sterowania do stabilizacji parametrów procesu obróbki wibracyjnej, wykorzystujący sprężysty przemiennik falowodowy generujący różne drgania (rys. 3).

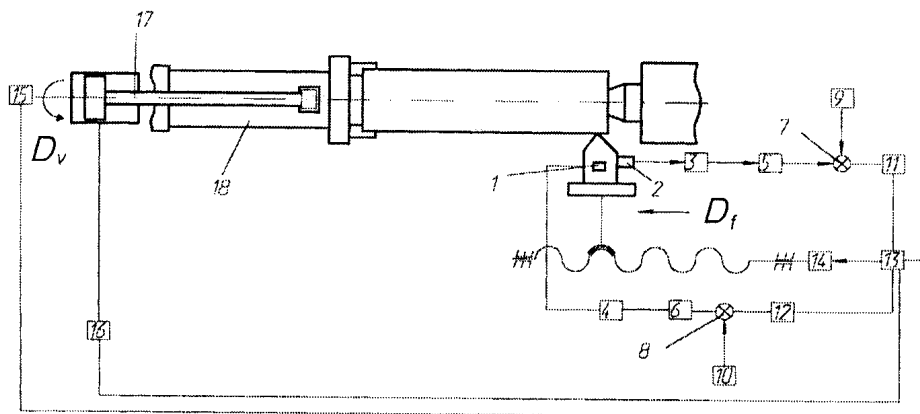


Rys. 3. Układ technologiczny z przemiennikiem falowodowym
Fig. 3. Technological system with the inverter

Obróbka jest wykonywana w następujący sposób. Półfabrykat 1 ustawiany jest w przyrządzie 2 z elementem sprężystym 3, mającym rowki śrubowe 4. Półfabrykat wprowadzany jest w ruch obrotowy D_v , a narzędzie 5 realizuje ruch posuwowy D_f wzdłuż półfabrykatu 1. Przy wcinaniu się narzędzia 5 w półfabrykat 1 ma miejsce jego skreńca oraz odkształcenie wzdłużne.

W wyniku okresowych procesów relaksacyjnych, związanych z podziałem wiórów w strefie ich powstawania w elemencie sprężystym 3, od półfabrykatu 1

podpartego kłemu osadzonym na sprężynie 7 generowane są kompleksowe drgania skrętne-wzdłużne A_{wz} .



Rys. 4. Schemat układu automatycznego sterowania procesem toczenia
Fig. 4. The diagram of automated control system of turning

Obwód sterowania (rys. 4) zawiera czujniki 1 i 2 emisji wibroakustycznej stycznej i wzdłużnej (EWA), które przez wzmacniacze 3 i 4, przetworniki 5 i 6 są połączone z sumatorami 7 i 8, do których podłączone są zadajniki wzdłużnej i stycznej składowych wibracji 9 i 10. Obwody poprzez przetworniki 11 i 12, podłączone są do przełącznika 13 połączonego z napędami posuwów 14, prędkości 15 i napędem 16 naciągu cięgna 17 elementu sprężystego 18.

W trakcie obróbki wibracyjnej prowadzona jest diagnostyka procesu skrawania - wykonywany jest pomiar EWA w kierunkach osiowym i stycznym, co umożliwia określenie amplitudy i częstotliwości drgań względnych w tych kierunkach a przez to kształtu drgań. Ponieważ proces powstawania wióra określający drgania zależy od stałych składowych siły skrawania, jest ona stabilizowana poprzez sterowanie posuwem.

Uzyskanie wysokiej efektywności skrawania wymaga utrzymywania w określonym zakresie częstotliwości drgań elementu układu technologicznego, generującego drgania kompleksowe a przez to odpowiedniego kształtu i amplitudy drgań. W tym celu dla różnych operacji należy zastosować różne nastawienia układu technologicznego z uwzględnieniem kształtu amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej (ACHCZ) podukładu nieliniowego „półfabrykat-element sprężysty”.

Kształt drgań przemiennika falowodowego lub noża zastosowanych do wytworzenia drgań określany jest w funkcji częstotliwości wzbudzenia i częstotliwości własnej drgań podukładu „półfabrykat-element sprężysty” (w zależności od niego generowane są głównie drgania wzdłużne, skręcające lub kompleksowe).

Toczenie zgrubne należy wykonywać na wznoszącej się (dorezonansowej) gałęzi ACHCZ podukładu nieliniowego „element sprężysty - półfabrykat). Do toczenia dokładnego wykorzystywana jest gałąź zarezonansowa ACHCZ.

Częstotliwość i amplituda drgań są określane parametrami nastawienia technologicznego: charakterystykami elementu sprężystego – przemiennika falowodowego (stopniem jego ściśnięcia, skokiem i głębokością rowków śrubowych) oraz parametrami skrawania. Przy zastosowaniu układu sterowania regulowanie częstotliwości drgań wykonywane jest zgodnie z zależnością:

$$f = \frac{1000v_c}{60k_L l}, \quad (3)$$

gdzie: v_c - prędkość skrawania;
 k_L - współczynnik spęczenia wióra;
 l - długość segmentu wióra.

Sterowanie prędkością skrawania stabilizuje częstotliwość powstawania wióra. Rezonans na składowej skręcającej ma miejsce przy niższych częstotliwościach, niż na składowej wzdłużnej. Sterując wielkością naciągu elementu sprężystego, określa się wymagane drgania dla różnych rodzajów obróbki (zgrubnej lub wykańczającej). Obróbka wykańczająca realizowana jest przy większej prędkości skrawania, co wiąże się z wyższą częstotliwością powstawania wióra i odpowiednio wyższą częstotliwością drgań, wymuszonych. Wstępnie należy, więc ustawić sztywność sprężystego przetwornika dla uzyskania rezonansu na składowej skręcającej. Częstotliwość własna elementu sprężystego powinna być większa (w wyniku większej jego sztywności).

PODSUMOWANIE

Obróbka zgrubna przy rezonansie drgań wzdłużnych umożliwia stabilne rozdrabnianie wióra i zwiększenie dokładności kształtu. Przy rezonansie na składowej skręcającej drgań przy odpowiedniej częstotliwości drgań, uzyskiwana jest maksymalna dokładność kształtu w przekroju poprzecznym.

W porównaniu z obróbką przy zastosowaniu standardowego wyposażenia technologicznego zastosowanie układu technologicznego z obwodem stycznym zwiększa dokładność od 2 do 4 razy, a układ sterowania umożliwia stabilizację parametrów dokładności i mikroprofilu w kierunku wzdłużnym.

Obróbka półfabrykatów o małej sztywności ze sterowaniem charakterystykami dynamicznymi procesu skrawania jest możliwa po dokonaniu minimalnej modernizacji urządzeń produkcyjnych. Umożliwia to zwiększenie dokładności w porównaniu z technologią tradycyjną.

PIŚMIENNICTWO

1. Draczow A., Taranenko G., Taranenko W., Hałas W, Świć A.: Sterowanie obróbką wibracyjną wałów długowymiarowych. Pomiary. Automatyka. Robotyka. Miesięcznik naukowo-techniczny nr 2, 2009, s. 132 – 138.
2. Drachev A., Taranenko G., Taranenko V., Świć A.: Sposob termomekhanicheskoy obrabotki nezhestkikh dlinnomernykh valov. Modern technologies, quality, restructuration. Kishinev 2009.
3. Eliasberg M. N., Demczenko V. A., Savinov I. A. Sposob strukturnogo povyszenia vibroustoiczivosti pri rezanii. Stanki i instrument, 1983, №4, s 3-7.
4. Kedrov S. S. Kolebania metallorezuszczich Stankom. Moskva: Mashinostroenie, 1978, 199 s.
5. Poduraev V. N. Obrabotka rezaniem s vibraciami. Moskva: Mashinostroenie, 1970, 350 s.
6. Świć A. Technologia obróbki wałów o małej sztywności. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2009, 244 s.
7. Taranenko W., Świć A.: Urządzenia sterujące dokładnością obróbki części maszyn o małej sztywności. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2006, 186 s.

CONTROLLING THE DYNAMIC SYSTEM OF MACHINING AXIAL SYMMETRIC LOW RIGID ELEMENTS**Summary**

The metal-cutting technological system update by the tangent control circuit for the precision and productivity increasing is substantiated and approved. The automatic control system for the operating this technological system is observed.

Keywords: control, electrochemical processing, non-rigid long length shafts.