ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: MECHANIKA z. 68 Nr kol. 664

Eugeniusz BLIŹNICKI

METODA STABILIZACJI WYBRANEGO ELEKTRO-HYDRAULICZNEGO UKŁADU KOPIUJĄCEGO

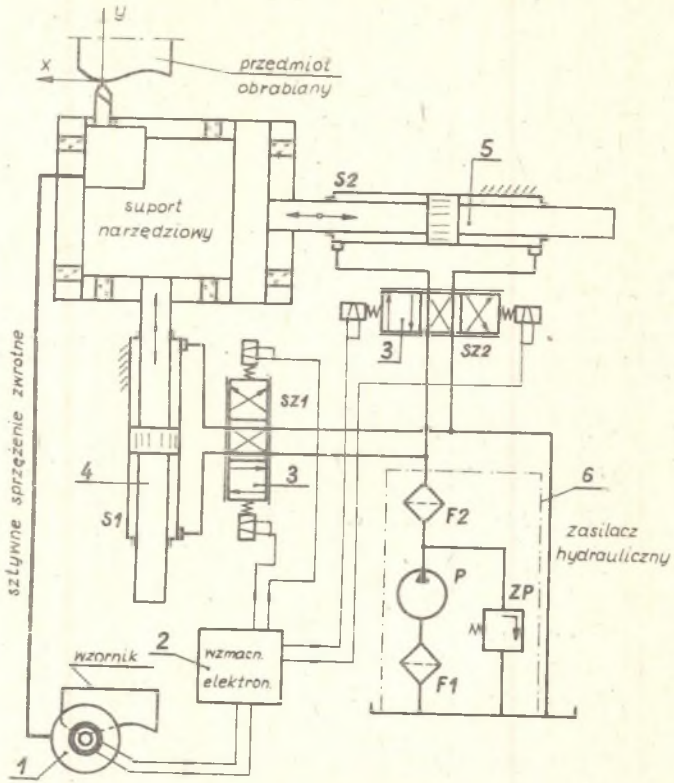
Streszczenie. Przedstawiono analizę teoretyczną elektro-hydraulicznego układu kopiującego przeznaczonego dla tokarek. Konstrukcja układu oparta została na gotowych, dostępnych elementach sterujących i roboczych. Analiza prowadzona pod kątem stabilności układu wskazała na konieczność zastosowania dodatkowego czynnika stabilizującego o dużej skuteczności. Spośród możliwych metod stabilizacji zastosowano przyspieszeniowe sprzężenie zwrotne. Sprzężenie takie, w rozważanym przypadku technicznie możliwe w realizacji, zapewnia dużą skuteczność tłumienia przebiegów przejściowych, nie wprowadzając jednocześnie dodatkowych błędów statycznych.

1. WSTĘP

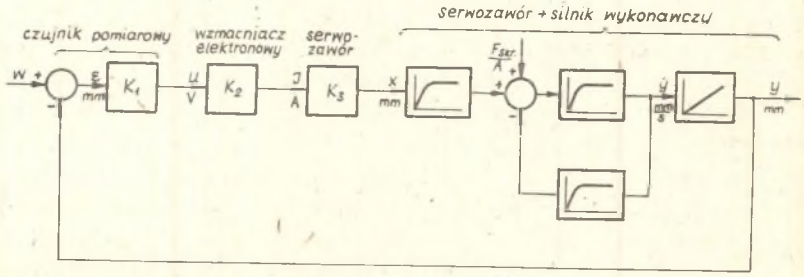
Rozwój w dziedzinie elektroniki i napędów hydraulicznych oraz konieczność stosowania automatycznego sterowania maszyn i urządzeń przyczyniły się do coraz bardziej widocznego rozwoju napędu i sterowania elektro- hydraulicznego. Serwomechanizmy takie łączą w sobie zalety układów elektrycznych, tj. wysoką dokładność, elastyczność, łatwość realizacji funkcji logicznych oraz zalety układów hydraulicznych, tj. duże wzmocnienie mocy, duże prędkości odpowiedzi, wysoką niezawodność [1,3]. Jedną z dziedzin, w której aktualnie serwomechanizmy elektro-hydrauliczne znajdują szerokie zastosowanie, są obrabiarki ze sterowaniem numerycznym oraz obrabiarki do obróbki kopiowaniem. Elektro-hydrauliczne układy kopiujące dwukoordynatowe pozwalają na odtwarzanie dowolnie skomplikowanych kształtów, zapewniając jednocześnie wysoką dokładność geometryczną obróbki.

W opracowaniu przedstawiono analizę teoretyczną elektro-hydraulicznego dwukoordynatowego układu kopiującego zaproponowanego do zastosowania w tokarko-kołówkach i karuzelówkach do obróbki kolejowych zestawów kołowych [5]. Schemat układu kopiującego pokazano na rys. 1.

Jako czujnik pomiarowy 1, współpracujący ze wzornikiem zarysu, zastosowano dwuwyjściowy czujnik indukcyjny typu SIMOKOP R-21 [6]. Wzmacniacz elektronowy 2, zaprojektowany i wykonany we własnym zakresie, zapewnia właściwą współpracę czujnika pomiarowego ze wzmacniaczem mocy, którym jest serwozawór elektro-hydrauliczny typu UZD 16/50 [7]. Żądane położenie narzędzia uzyskuje się za pomocą dwóch silników hydraulicznych 4 i 5, przemieszczających narzędzie w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Układ



Rys. 1. Schemat elektro-hydraulicznego układu kopiującego



Rys. 2. Schemat blokowy elektro-hydraulicznego układu kopiującego

kopiujący posiada sztywne sprzężenie zwrotne pomiędzy położeniem obudowy czujnika 1 oraz położeniem narzędzia w kierunku osi xiy. W układzie występują dwa obwody: elektryczny, zawierający czujnik pomiarowy 1, wzmacniacz elektronowy 2 i elektromagnesy serwozaworu 3 oraz obwód hydrauliczny zawierający zasilacz hydrauliczny 6, część hydrauliczną serwozaworu 3 i silniki wykonawcze 4 i 5. Elementem wiążącym obydwa obwody jest serwozawór 3. Schemat blokowy układu kopiującego pokazano na rys. 2. Na schemacie tym wyróżniono odpowiednimi blokami kolejne elementy układu, co istotnie ułatwia jego analizę teoretyczną.

2. ANALIZA TEORETYCZNA UKŁADU KOPIUJĄCEGO

Schemat blokowy układu kopiującego (rys. 2) zawiera człony bezinercyjne, opisujące wzmocnienie czujnika pomiarowego, wzmocnienie wzmacniacza elektronicznego oraz elektrycznej części sterującej serwozaworu. Dalsze elementy schematu to człony inercyjne i całkujący opisujące część hydrauliczną serwozaworu i silnika wykonawczego. Przy analizie układu zostanie wykorzystana metoda superpozycji polegająca na początkowo oddzielnym potraktowaniu obydwu grup członów schematu blokowego. Wykorzystując wyniki rozważań przeprowadzonych przez Ulricha [4] funkcja przejścia obwodu otwartego składającego się z suwaka sterującego 4-krawędziowego oraz silnika hydraulicznego prostoliniowego symetrycznego posiada postać kanoniczną:

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{K_4}{1 + 2\frac{\xi}{\omega_n} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}, \tag{1}$$

gdzie:

K_4 - współczynnik wzmocnienia serwozaworu i silnika

$$K_4 = \frac{p_p \cdot c}{A} \tag{2}$$

ω_n - częstość własna silnika hydraulicznego

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2 \cdot A^2 \cdot B}{V \cdot m}} \tag{3}$$

ξ - współczynnik tłumienia układu

$$\xi = \frac{1}{2 \cdot \omega_n} \cdot \left(\frac{B \cdot c}{V} \cdot u + \frac{f}{m}\right) \tag{4}$$

y [mm] - przemieszczenie imaka narzędziowego w kierunku y

x [mm] - przemieszczenie suwaka serwozaworu

s - operator Laplace'a

p_p [MPa] - ciśnienie zasilania układu

$c = \frac{2 \cdot k_v \cdot d_s}{\sqrt{\varrho \cdot p_p}}$ - współczynnik charakteryzujący suwak sterujący serwozaworu

k_v - współczynnik przepływu przez serwozawór

d_s - średnica suwaka sterującego serwozaworu

$\varrho \left[\frac{kg}{m^3}\right]$ - gęstość oleju roboczego

A [cm^2] - powierzchnia czynna silnika wykonawczego

B [MPa] - moduł sprężystości oleju roboczego

V [cm^3] - połowa objętości cylindra roboczego wraz z pojemnością przewodów łączących

m [kg] - masa poruszanych części suportu kopiującego

$u = 25\ \mu m$ - otwarcie wstępne suwaka sterującego serwozaworu

$f \left[\frac{N \cdot s}{m}\right]$ - współczynnik tłumienia lepkiego w prowadnicach suportu i uszczelnieniach silnika wykonawczego.

Funkcja przejścia czujnika kopiującego, wzmacniacza elektronowego oraz części elektrycznej serwozaworu określona jest zależnością:

$$K' = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3. \tag{5}$$

Stosując metodę superpozycji oraz wyniki rozważań Guillona [1], zastępcza funkcja przejścia obwodu otwartego układu kopiującego ma postać:

$$H_o(s) = \frac{y(s)}{\delta(s)} = \frac{1}{s} \frac{K}{1 + 2 \cdot \frac{\xi}{\omega_n} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}, \tag{6}$$

gdzie:

$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{p_p \cdot c}{A}$ - zastępczy współczynnik wzmocnienia układu kopiującego

ε [mm] - błąd kopiowania w stanie przejściowym

ξ, ω_n - zachowują postać (3) i (4).

Przed przystąpieniem do oceny stabilności układu wyznaczono i określono wartości odpowiednich współczynników korzystając z wyników obliczeń konstrukcyjnych lub z katalogów i norm. Założenia wyjściowe do konstrukcji układu kopiującego stanowiły: główna siła skrawania $P_z = 50$ kN, $P_y = P_x = 0{,}5\ P_z$, skok obydwu silników wykonawczych $l = 250$ mm, dokładność pracy - możliwie wysoka, ślizgowe prowadnice suportu narzędziowego. Analiza dynamiczna przeprowadzona zostanie dla części sterująco-roboczej przemieszczania narzędzia w kierunku osi y.

W oparciu o wstępne obliczenia konstrukcyjne określono podstawowe parametry układu kopiującego 5:

$p_p = 4{,}84$ MPa $\qquad u = 25\ \mu m$

$d_1 = 45$ mm $\qquad d_s = 16$ mm

$D_1 = 100$ mm $\qquad k_v = 0{,}8$

$A = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - d_1^2) = 62{,}3\ cm^3 \qquad \varrho = 883\ \frac{kg}{m^3}$

$B = 1648$ MPa

$V = \frac{1}{2}\ 1.A = 783\ cm^3 \qquad m = 386$ kg

Tłumienie lepkie w prowadnicach suportu określono na podstawie zależności [1]:

$$f = \frac{A_{st} \cdot \eta}{h}\left[\frac{N \cdot s}{m}\right], \tag{7}$$

gdzie:

$A_{st} = 4536\ cm^2$ - obliczona na podstawie wymiarów geometrycznych powierzchnia styku prowadnic i prowadnika suportu poprzecznego

$\eta = 0{,}0497\ \frac{kg}{m \cdot s}$ - współczynnik lepkości oleju smarującego

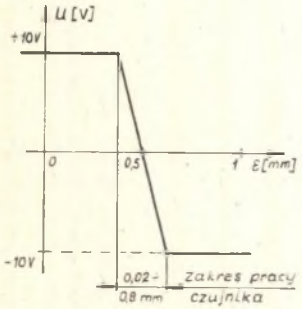
$h = 8\ \mu m$ - założony luz w prowadnicach;

po obliczeniach $\qquad f = 2818\ \frac{N \cdot s}{m}$

Podstawiając wartości obliczone również:

$$c = 1{,}23 \cdot 10^{-6}\ \frac{m^4}{N \cdot s}$$

$$K_4 = 956\ \frac{1}{s}.$$



Rys. 3. Charakterystyka statyczna czujnika typu SIMOKOP R-21

Współczynniki wzmocnienia K_1, K_2, K_3 określono na podstawie charakterystyk statycznych poszczególnych elementów układu kopiującego. Na podstawie charakterystyki statycznej czujnika SIMOKOP R-21 (rys. 3) obliczono:

$$K_1 = \frac{\Delta U}{\Delta \varepsilon} = \frac{10\ V}{0{,}02 \div 0{,}08\ mm} = 500 \div 12{,}5\ \frac{V}{mm}$$

Wartość współczynnika K_1 ściśle wiąże się z czułością czujnika pomiarowego. Chcąc uzyskać wysoką dokładność pracy układu należy przyjmować duże wartości współczynnika K_1. Współczynnik K_2 charakteryzuje

wzmacniacz elektronowy. Przy konieczności zapewnienia maksymalnej wartości prądu w cewkach elektromagnesów serwozaworu $I = 1,4$ A oraz maksymalnej wartości napięcia wyjściowego czujnika pomiarowego 10 V

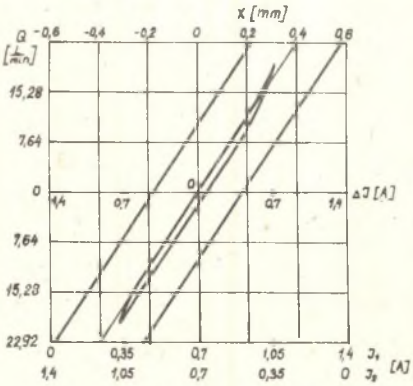
$$K_2 = \frac{I}{U} = \frac{1,4\ A}{10\ V} = 0,14\ \frac{A}{V}.$$

Współczynnik K_3 określa wzmocnienie części elektrycznej serwozaworu. Na podstawie charakterystyki statycznej serwozaworu (rys. 4):

$$K_3 = \frac{x}{I} = \frac{0,3\ mm}{0,7\ A} = 0,43\ \frac{mm}{A}.$$

Wobec tego sumaryczne wzmocnienie układu kopiującego jest równe:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 = 28775,6 \div 719,4\ \frac{1}{s}.$$



Rys. 4. Charakterystyka statyczna serwozaworu typu UZD 16/50

Na podstawie twierdzenia Rutha-Hurwitza warunek stabilności ma postać:

$$K < 2 \cdot \xi \cdot \omega_n = 2 \cdot 0,055 \cdot 651 = 71,61\ \frac{1}{s}$$

przy czym wartości ξ i ω_n obliczono z zależności (3) i (4).

Jak widać z powyższej zależności, warunek stabilności nie jest spełniony. Zachodzi więc konieczność zastosowania odpowiednich czynników stabilizujących, które zapewniłyby zwiększenie współczynnika tłumienia ξ, nie powodując jednak zmniejszenia dokładności pracy układu.

3. STABILIZACJA UKŁADU KOPIUJĄCEGO

Spośród stosowanych w praktyce sposobów poprawy stabilności serwomechanizmów można wyróżnić następujące:

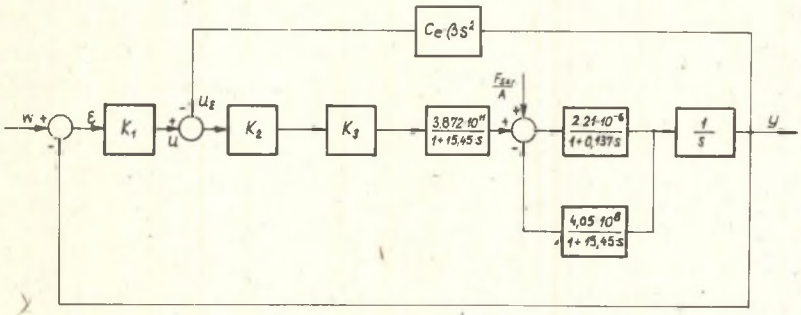
- poprzez zmiany konstrukcyjne w części sterującej serwozaworu i zespołu wykonawczego układu,
- przez wprowadzenie sztucznych przecieków w silniku wykonawczym lub w rozdzielaczu sterującym,
- poprzez stosowanie specjalnych członów korekcyjnych,
- poprzez dodatkowe sprzężenia zwrotne.

Ze względu na zastosowanie w układzie elementów normalnych możliwości zwiększenia współczynnika należy szukać jedynie w układzie prowadnicowym suportu poprzez zapewnienie odpowiedniej wartości siły tarcia Coulomba. Siła ta zapewnia znaczny efekt tłumiący, zwiększający współczynnik tłumienia lepkiego f [1,2]. Niekorzystną stroną istnienia dużej siły tarcia Coulomba jest proporcjonalny błąd statyczny i strefa nieczułości nie dająca się pogodzić z wymaganą wysoką dokładnością pracy układu.

Zastosowanie sztucznych przecieków oraz dodatkowych członów korekcyjnych w serwozaworze i silniku wykonawczym charakteryzuje się ograniczoną możliwością wzrostu współczynnika ξ i podobnie powoduje błąd statyczny wpływający w efekcie na wzrost błędów odwzorowania wzornika na obrabianym przedmiocie.

Najkorzystniejszą stabilizację zapewniają dodatkowe sprzężenia zwrotne, szczególnie o charakterze przyspieszeniowym. Według [1,2] sprzężenie przyspieszeniowe zapewnia wymagany wzrost współczynnika tłumienia bez ujemnego wpływu na dokładność pracy układu. W rozważanym przypadku sprzężenie takie jest techniczne możliwe do zrealizowania.

Istota sprzężenia polega na wprowadzeniu dodatkowego obwodu elektrycznego pomiaru przemieszczenia narzędzia, podwójnym różniczkowaniu sygnału przemieszczenia oraz wprowadzeniu tego korygującego sygnału na wejście wzmacniacza elektronicznego (rys. 5).



Rys. 5. Schemat blokowy układu kopiującego z dodatkowym przyspieszeniowym sprzężeniem zwrotnym

Dokonując przekształceń schematu blokowego z rys. 5 uzyskano funkcję przejścia obwodu otwartego w postaci:

$$H_o(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{K}{1 + 2 \cdot \frac{\xi + \xi'}{\omega_n} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}, \qquad (8)$$

gdzie:

$\xi' = 0,5 \cdot K \cdot \frac{\beta}{K_1} \cdot \omega_n \cdot C_e$ – dodatkowy współczynnik tłumienia względnego w wyniku zastosowania przyspieszeniowego sprzężenia zwrotnego.

Warunek stabilności wg kryterium Rutha-Hurwitza przyjmuje teraz postać:

$$K < (2 \cdot \xi + \frac{K}{K_1} \cdot \beta \cdot \omega_n \cdot C_e) \cdot \omega_n \tag{9}$$

Po przekształceniu nierówności określono niezbędną wartość współczynnika:

$$\beta > (\frac{1}{\omega_n} - \frac{2 \cdot \xi}{K}) \cdot \frac{K_1}{\omega_n \cdot C_e}. \tag{10}$$

Założono, że w sprzężeniu zwrotnym zostanie zastosowany czujnik indukcyjny firmy Hottinger, dla którego współczynnik C_e ma wartość:

$$C_e = \frac{dU}{dy} = 25 \frac{V}{mm}.$$

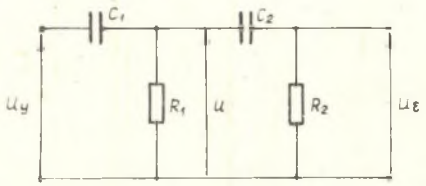
Przyjmując dalej, że układ kopiujący powinien zapewniać możliwie wysoką dokładność, tzn. powinien posiadać wysoką czułość, przyjęto:

$$K1 = 100 \frac{V}{mm},$$

wtedy

$$K = 5755 \frac{1}{s}$$

otrzymano: $\beta > 9,32 \cdot 10^{-6}\ s^2$.



Rys. 6. Schemat elektrycznej realizacji przyspieszeniowego sprzężenia zwrotnego

Dla realizacji sprzężenia zwrotnego zastosowano podwójny elektryczny układ różniczkujący jak na rys. 6.

Funkcja przejścia tego układu wyraża się zależnością:

$$\frac{U_\varepsilon(s)}{U_y(s)} = \frac{T_1 \cdot T_2 \cdot s^2}{(1 + T_1 \cdot s) \cdot (1 + T_2 \cdot s)} \tag{11}$$

Zakładając, że $T_1 \cdot T_2 = \beta \cdot \frac{C_e}{K_1}$ oraz $T_1 = T_2$ obliczono stałe czasowe dla obliczonej poprzednio wartości współczynnika β:

$$T_1 = T_2 > 1,526 \cdot 10^{-3}\ s.$$

Ponieważ stałe czasowe T_1 i T_2 przybierają małe wartości, zależność (11) można uprościć do postaci:

$$\frac{U_\varepsilon(s)}{U_y(s)} = \beta \cdot \frac{C}{K_1} \cdot s^2. \tag{12}$$

Tak więc proponowane sprzężenie zwrotne ma charakter przyspieszeniowy. Wartości oporów R i pojemności C należy tak dobrać, aby spełniony był warunek:

$$T_1 = T_2 = R \cdot C \tag{13}$$

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Serwomechanizmy hydrauliczne i elektro-hydrauliczne oprócz niewątpliwych zalet posiadają jednak zasadniczą wadę, którą jest zbyt małe tłumienie w stanach przejściowych. Problem ten jest szczególnie widoczny przy wyższych ciśnieniach pracy układu. Mając na uwadze wysokie wymagania dokładnościowe stawiane tym układom zachodzi konieczność stosowania dodatkowych środków stabilizujących. Zastosowanie przyspieszeniowego sprzężenia zwrotnego zapewnia wymaganą skuteczność stabilizacji, nie powodując błędów statycznych, które wystąpiłyby przy stosowaniu innych metod stabilizacji. Zastosowane sprzężenie zwrotne wprowadza dodatkowy współczynnik tłumienia względnego o wartości $\xi = 4,36$.

Przeprowadzona w opracowaniu analizy elektro-hydraulicznego układu kopiującego nasuwa następujące wnioski:

1. Serwomechanizmy elektro-hydrauliczne stosowane w obrabiarkach charakteryzują się niedostatecznym tłumieniem, wymagając stosowania dodatkowych środków stabilizujących.

2. Spośród stosowanych metod stabilizacji najkorzystniejsze cechy wykazuje przyspieszeniowe sprzężenie zwrotne charakteryzujące się dużą skutecznością tłumienia przebiegów przejściowych i nie wprowadzające dodatkowych błędów statycznych, pogarszających dokładność obróbki.

3. Przyspieszeniowe sprzężenie zwrotne jest stosunkowo łatwe w realizacji w rozważanym układzie, gdyż wymaga zastosowania aktualnie dostępnych czujników pomiarowych i prostych elektrycznych układów różniczkujących.

4. Sposób realizacji przyspieszeniowego sprzężenia zwrotnego umożliwia ciągłą regulację wartości współczynnika tłumienia względnego (zmiana R lub C), co pozwala na uzyskanie żądanego zapasu stabilności układu kopiującego jako układu regulacji automatycznej.

LITERATURA

[1] GUILLON M.: Teoria i obliczanie układów hydraulicznych. WNT, Warszawa 1967.

[2] ŻELAZNY M.: Podstawy automatyki. WNT, Warszawa 1970.

[3] ŻIELIŃSKI A.: Napęd i sterowanie hydrauliczne obrabiarek. WNT, Warszawa 1972.

[4] ULRICH U.J.: Die hydraulische Nachlaufregelung an Werkzeugmaschinen. Technische Rundschau 44, i 52/1968.

[5] Urządzenie do ciągłego kopiowania dwukoordynatowego profilu zestawu kołowego. Praca naukowo-badawcza. Gliwice 1978.

[6] SIMOKOP R-21. Kopiersteuerungen fur 2 Achsen. Katalog firmowy.

[7] Wzmacniacz elektro-hydrauliczny UZD 16/50. Karta informacyjna.

МЕТОД СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫБРАННОЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КОПИРОВАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Р е з ю м е

Представлен теоретический анализ электрогидравлической копировальной системы предназначенной для токарных станков. Конструкция системы опирается на готовых, доступных управляющих и рабочих элементах. Анализ выполненный с точки зрения стабильности системы указывает на необходимость применения дополнительного стабилизирующего фактора большой эффективности. Из количества возможных методов стабилизации был применен метод ускорящей обратной связи. Такая связь технически возможна для осуществления, обеспечивает высокую эффективность демпфирования переходных процессов без одновременного ввода добавочных статических погрешностей.

THE METHOD OF STABILIZATION OF THE SELECTED ELECTRO-HYDRAULIC COPYING SYSTEM

S u m m a r y

Theoretical analysis of the electro-hydraulic copying system for lathes has been shown based on the available industrial working and controling elements. The analysis of the system stabilization has shown the necessity of the application of the additional stabilization factor with high effectiveness. The acceleration feedback as a method of a stabilization has been used. The feedback in the discussed example as a technically possible realization assures the high effectiveness of transient damping without introducing the additional static errors.