ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria: MECHANIKA z. 89 Nr kol. 966

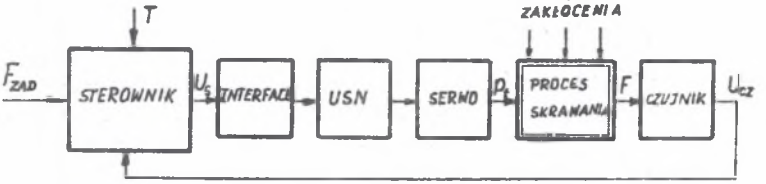
Jan KOSMOL

MODELOWANIE UKŁADU STEROWANIA ADAPTACYJNEGO NA MASZYNIE ANALOGOWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiona została metoda podejścia do symulacji analogowej układu sterowania adaptacyjnego dla obrabiarek. Przedstawione zostały modele matematyczne bloków stanowiących części składowe obwodu regulacji jak również struktura tzw. STEROWNIKA. Zaproponowany schemat na maszynę analogową wiernie odzwierciedla rzeczywisty układ sterowania adaptacyjnego. Pozwala on na optymalizację struktury i parametrów sterownika.

1. Wstęp

Układy sterowania adaptacyjnego granicznego (ACC) dla obrabiarek stanowią złożone systemy automatycznej regulacji. Wielkością regulowaną jest najczęściej jeden z parametrów siłowych, np.: siła na ostrzu noża, moment od siły skrawania, moc napędu głównego (dotyczy to wyłącznie obróbki wstępnej). Natomiast parametrem sterowanym (nastawianym) najczęściej bywa prędkość posuwu lub rzadziej - prędkość ruchu głównego. W takim przypadku ogólny schemat blokowy układu sterowania adaptacyjnego, technologicznego (ACT) można przedstawić jak na rys. 1.



Rys. 1 Schemat blokowy układu sterowania adaptacyjnego
Fig. 1 Block diagram of the Adaptive Controller

Obwód regulacji zawiera (w najogólniejszym przypadku) następujące bloki:

- blok STEROWNIKA
- blok UKŁADU DOPASOWUJĄCEGO (Interface do USN)
- blok UKŁADU STEROWANIA NUMERYCZNEGO OBRABIARKI

- blok NAPĘDU POSUWU (lub ruchu głównego)
- blok PROCESU SKRAWANIA (właściwy obiekt sterowania)
- blok CZUJNIKA WIELKOŚCI REGULOWANEJ.

Każdy z wymienionych bloków posiada własną charakterystykę statyczną i dynamiczną. Zadaniem projektującego układ ACC jest więc taki dobór struktury i nastaw STEROWNIKA, aby uzyskać:

- spełnienie żądanego celu (stabilizowanie wielkości regulowanej na zadanym poziomie pomimo występujących zakłóceń),
- stabilną pracę zamkniętego układu regulacji pomimo występujących zakłóceń,
- optymalne przebiegi regulacji.

Spełnienie powyższych żądań wymaga w pierwszym rzędzie znajomości modeli matematycznych poszczególnych bloków.

2. Modele matematyczne bloków składowych układu ACC

Obiektem sterowania jest PROCES SKRAWANIA, który z matematycznego punktu widzenia przedstawia zależność funkcyjną pomiędzy wielkością wyjściową F (siła skrawania) a wielkością wejściową p_t (prędkość posuwu),

$$F = f(p_t, Z) , \tag{1}$$

gdzie:

F - wielkość wyjściowa z PROCESU SKRAWANIA,
p_t - wielkość wejściowa do PROCESU SKRAWANIA,
Z - zakłócenia w PROCESIE SKRAWANIA.

Model PROCESU SKRAWANIA (1) był tematem wielu prac naukowych. Najogólniej można stwierdzić, że jak dotąd, nie jest dostatecznie dobrze rozwiązany. Badania własne, prowadzone nad modelem procesu wytaczania otworów na wiertako-frezerkach, potwierdziły, że w wielu przypadkach można go przedstawić następująco: [1] :

$$F_v(s) = \frac{m_v + W \cdot (m_v \; n_r - m_r \; n_v)}{(1 + n_r \; W) + A \; (1 - e^{-sT})} \cdot \frac{1 - e^{-sT}}{s} \cdot p_t(s), \tag{2}$$

gdzie:

$F_v(s)$ - transformata wielkości regulowanej (siła skrawania),
$p_t(s)$ - transformata prędkości posuwu,

m_v, n_v, m_r, n_r - współczynniki wzmocnienia w PROCESIE SKRAWANIA,
W - złożona funkcja podatności obrabiarki,
A - złożona funkcja współczynników wzmocnienia w PROCESIE SKRAWANIA i podatności obrabiarki,
T - okres obrotu wrzeciona,
s - operator Laplace'a.

Model NAPĘDU POSUWU uzależniony jest od rodzaju napędu. Dla najczęściej spotykanego napędu elektrycznego, serwomechanizmowego, stosuje się model oscylacyjny III rzędu w postaci: [2] :

$$\frac{p_t(s)}{U_s(s)} = \frac{k_s}{1 + \frac{s}{k_v} + \frac{2\,\xi_s}{k_v\,\omega_s} \cdot s^2 + \frac{1}{k_v\,\omega_s^2} \cdot s^3}, \tag{3}$$

gdzie:

$U_s(s)$ - transformata sygnału wejściowego do serwonapędu,
ω_s - pulsacja własna serwonapędu,
ξ_s - bezwymiarowy współczynnik tłumienia,
k_s - współczynnik wzmocnienia serwonapędu,
k_v - współczynnik wzmocnienia prędkościowego.

Model w postaci (3) jest pewnym uproszczeniem rzeczywistości. Między innymi badania własne wykazały, że istotną rolę odgrywa "czas martwy", jaki pojawia się np. przy odpowiedziach skokowych. Dla serwonapędu o bardzo dobrych własnościach dynamicznych czas martwy jest porównywalny z wartościami stałej czasowej serwonapędu. Tego "czasu martwego" nie uwzględniono w modelu (3).

Mówiąc o modelu NAPĘDU POSUWU w postaci (3), najczęściej uwzględnia się już model układu sterowania numerycznego. Układ sterowania numerycznego wprowadza bowiem jedynie zwłokę czasową ("czas martwy" - np. dla CNC NUCON-400, zwłoka czasowa wynosi 10 ms) pomiędzy zmianą sygnału wejściowego U_s a odpowiednią zmianą prędkości posuwu p_t.

Model czujnika uzależniony jest od rodzaju czujnika. Dla najczęściej występujących czujników mechanicznych (czujniki do pomiaru sił skrawania lub momentów od siły skrawania) czujnik opisuje się elementem oscylacyjnym II rzędu:

$$\frac{U_{cz}(s)}{F(s)} = \frac{k_{cz}}{\omega_{cz}^2 + 2\,\xi_{cz} \cdot \omega_{cz} \cdot s + s^2}, \tag{4}$$

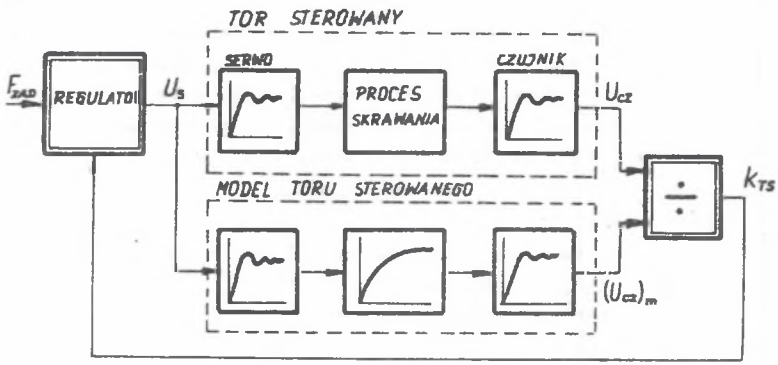
gdzie:

$U_{cz}(s)$ - transformata sygnału wyjściowego z Czujnika,
ω_{cz} - pulsacja własna Czujnika,
ξ_{cz} - bezwymiarowy współczynnik tłumienia,
k_{cz} - współczynnik wzmocnienia Czujnika.

3. Opis struktury i zasady działania STEROWNIKA

Sterownik jest tą częścią obwodu sterowania, która zapewnia osiągnięcie żądanego celu. Jednocześnie musi spełniać rolę regulatora w zamkniętym obwodzie regulacji.

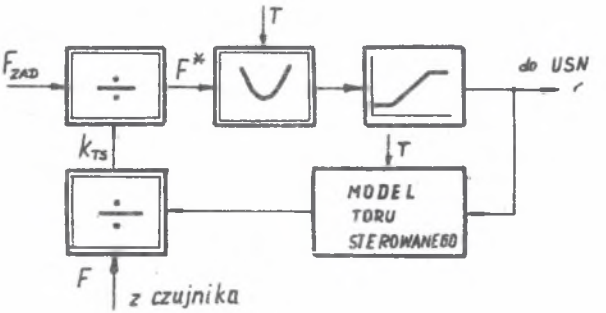
W PROCESIE SKRAWANIA występują ZAKŁÓCENIA, które przyczyniają się do zmiany współczynników wzmocnienia w modelu. Zmiany te są bardzo duże i ostrożnie szacując, trzeba liczyć się z wahaniami 1:50 i więcej. Tak znaczne zmiany parametrów obiektu sterowanego wymagają samoczynnej korekcji nastaw regulatora (odwrotnie proporcjonalnie do występujących zakłóceń) - w przeciwnym bowiem wypadku układ regulacji będzie niestabilny. Dlatego podstawowym zadaniem Sterownika jako regulatora jest samoczynna korekcja wzmocnienia w obwodzie sterowania. Schemat funkcjonalny Sterownika przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2 Schemat funkcjonalny sterownika ACC
Fig. 2 Functional diagram of the ACC controller

W STEROWNIKU zamodelowany został cały Tor Sterowania. Sygnał wyjściowy U_s z REGULATORA zostaje doprowadzony zarówno do rzeczywistego toru sterowanego, jak i do jego modelu (model toru sterowanego posiada wzmocnienie równe jedności). Natomiast sygnały wyjściowe z toru sterowanego U_{cz} i jego modelu $(U_{cz})_m$ wchodzą do bloku dzielącego, gdzie wyznaczana jest aktu-

alna wartość wzmocnienia k_{TS} toru sterowanego. Tak wyznaczona wartość k_{TS} wprowadzana jest do REGULATORA. Schemat blokowy regulatora obrazuje rys. 3



Rys. 3 Schemat blokowy regulatora adaptacyjnego
Fig. 3 Block diagram of the adaptive controller

W regulatorze wartość zadana F_{ZAD} jest dzielona przez współczynnik k_{TS}. Tym sposobem w całym zamkniętym obwodzie regulacji współczynnik wzmocnienia pozostaje niezmienny. W regulatorze występują ponadto dwa bloki:

- blok "POSZUKIWANIA MINIMALNEJ WARTOŚCI F^*_{min}"
- blok "OGRANICZNIKA" sygnału wyjściowego z regulatora.

Blok "OGRANICZNIKA" jest pożądany ze względów technologicznych obróbki skrawaniem. Natomiast blok "POSZUKIWANIA F^*_{min}" jest konieczny z uwagi na możliwość występowania zakłóceń w PROCESIE SKRAWANIA o częstotliwościach zgodnych z częstością obrotową wrzeciona. Należy jeszcze zauważyć, że blok ten pełni swoją funkcję tylko wówczas, gdy $F_{ZAD} > F$ (wówczas działanie regulatora podobne jest do regulatora krokowego). W przeciwnym przypadku ($F_{ZAD} < F$) blok ten pełni funkcję regulatora typu P.

4. Model układu ACC na maszynę analogową

Z przedstawionego opisu STEROWNIKA wynika, że należy on do struktur bardzo złożonych. Zrealizowanie takiej struktury w technice analogowej spowoduje nadmierne rozbudowanie układu ACC.

Pojawia się więc pytanie: z jaką dokładnością (jeżeli idzie o parametry) oraz z jaką wiernością (jeżeli idzie o strukturę) musi zostać odwzorowany model toru sterowanego w rzeczywistym układzie ACC? Bowiem z punktu widzenia wykonania i ceny układu ACC celowe byłoby możliwie jak największe uproszczenie w stosunku do modeli przedstawionych zależnościami

(2)÷(4). Granicą takich uproszczeń jest odpowiedni zapas stabilności całego układu regulacji jak i minimalne żądania odnośnie wskaźników regulacji (czas regulacji, wielkość przeregulowania itp.).
Aby odpowiedzieć na tak postawione pytanie, postanowiono zamodelować cały układ sterowania adaptacyjnego na maszynie analogowej, a następnie dokonać badań analogowych porównawczych, wprowadzając kolejne uproszczenia w strukturze modelu toru sterowanego i w jego parametrach. W związku z tym opracowano schemat maszynowy układu sterowania adaptacyjnego na maszynę analogową, który przedstawiono na rys. 4. Schemat ten zbudowano w taki sposób, aby stanowił odwzorowanie schematów na rys. 2 i rys. 3. Przy modelowaniu PROCESU SKRAWANIA wykorzystano szereg Pade'a dla odwzorowania czasu martwego e^{-sT}. Maszyna analogowa nie posiada bowiem możliwości wiernego odwzorowania czasu martwego. W rezultacie PROCES SKRAWANIA odwzorowany jest członem oscylacyjnym II rzędu.

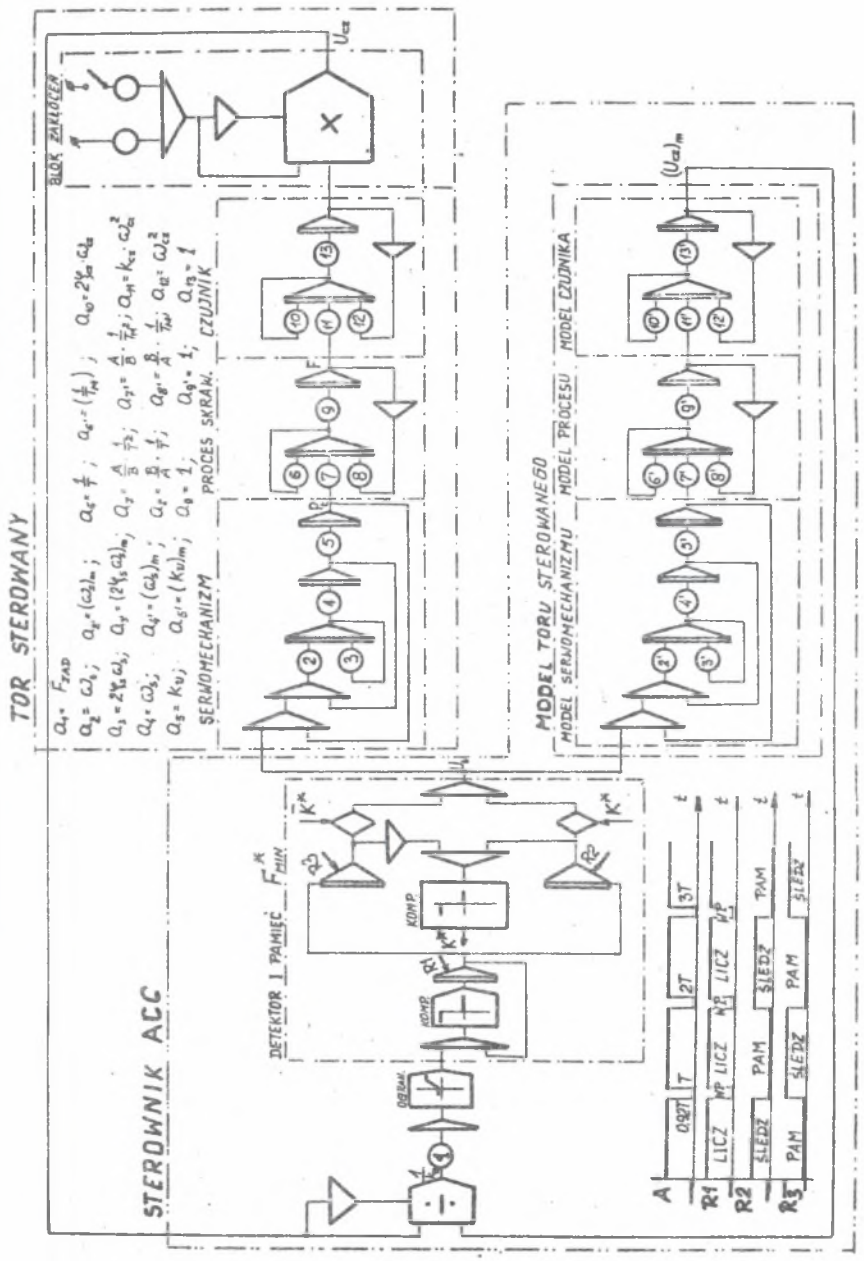
Blok "POSZUKIWANIA F^*_{min}" został zbudowany na bazie komparatora i kilku elementów licząco-pamiętających oraz śledząco-pamiętających. Do sterowania tymi elementami wykorzystano przystawkę logiczną maszyny analogowej. W przystawce logicznej generowano sygnały logiczne do sterowania pracą integratorów (sygnały R1, R2, R3) jak również sygnał taktu T (okres obrotu wrzeciona). Wykorzystując ponadto klucze i komparatory logiczne, uzyskano blok "Poszukiwania i zapamiętania F^*_{min}", który wiernie odtwarza układ rzeczywisty.

Blok "OGRANICZNIKA" zbudowano na bazie panelu przekaźnikowego, natomiast bloki dzielące na bazie mnożarki.

Przy badaniach wpływu stopnia uproszczenia struktury toru sterowanego na przebiegi regulacji kolejno upraszczano schemat maszynowy modelu procesu skrawania, serwomechanizmu i czujnika.
W krańcowych przypadkach każdy z tych elementów modelowany był w postaci inercji I rzędu.

Natomiast przy badaniach wpływu parametrów modelu toru sterowanego na przebiegi regulacji zmieniano (w sposób celowy) określone nastawy potencjometrów w modelu toru sterowanego, nie zmieniając natomiast nastaw potencjometrów w samym torze sterowanym.

W schemacie maszynowym układu ACC wyodrębniono mnożarkę, za pomocą której zmieniano wzmocnienia w torze sterowanym. Za pomocą tej mnożarki zmieniano (skokowo) wartości wzmocnienia, imitując w ten sposób działanie ZAKŁÓCEŃ w procesie skrawania.



Rys. 4 Schemat blokowy regulatora adaptacyjnego
Fig. 4 Analog computer block diagram of the ACC

5. Wyniki badań analogowych układu sterowania adaptacyjnego

Opracowany schemat układu sterowania adaptacyjnego na maszynę analogową jest na tyle uniwersalny, że umożliwia bardzo szerokie badania. Można więc prowadzić badania przebiegów regulacyjnych zarówno przy zmianach zakłócenia (skokowych lub okresowo-zmiennych), jak i zmianach wartości zadanej. W ramach niniejszych rozważań przeprowadzono badania przebiegów regulacyjnych przy skokowo wzrastającym i malejącym wzmocnieniu w procesie skrawania, jak również przy skokowo wzrastającej i malejącej wartości zadanej. Badania prowadzono dla szerokiej gamy parametrów toru sterowanego, a mianowicie:

- okresu $T = (1 \div 0,1)s$
- pulsacji własnej czujnika $\omega_{cz} = (30 \div 1000) \cdot s^{-1}$
- pulsacji własnej serwonapędu $\omega_s = (10 \div 150) \cdot s^{-1}$

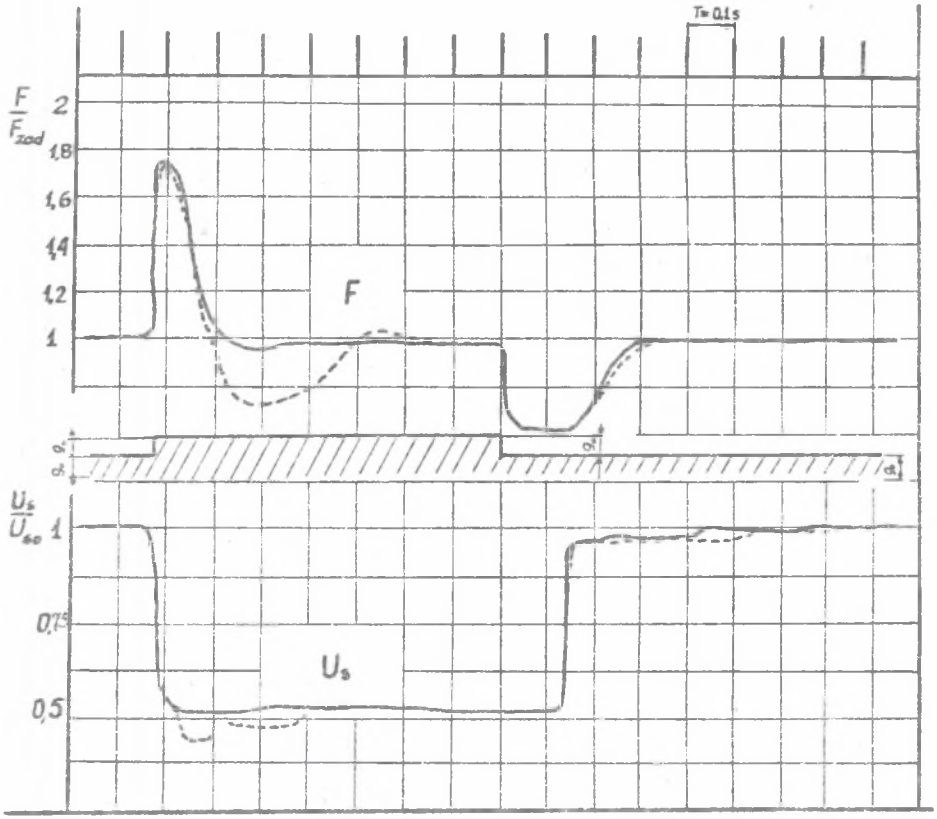
Badania polegały na zarejestrowaniu przebiegów regulacyjnych wielkości regulowanej i wielkości wyjściowej ze sterownika, dla różnych kombinacji parametrów toru sterowanego, przy skokowo wzrastającym i malejącym (o 100%) wzmocnieniu w procesie skrawania (wskutek skokowej zmiany zakłócenia).

Na rys. 5 przedstawiono przykładowy przebieg regulacji uzyskany w ramach tych badań (linia ciągła). Oscylogram zawiera przebieg siły skrawania F, wielkości wyjściowej ze sterownika U_s oraz takt T. Z przebiegów tych widać, że reakcja układu sterowania adaptacyjnego jest natychmiastowa, gdy wystąpił wzrost wzmocnienia ($g_o \rightarrow 2g_o$). Czas regulacji zawierał się w granicach ok. 3T. Natomiast, gdy wystąpiło zmniejszenie wzmocnienia ($2g_o \rightarrow g_o$), to układ reaguje z opóźnieniem. W tym przypadku czas regulacji zawierał się w granicach ok. 6·T.
Powyższy przykład dotyczył idealnego przypadku, w którym parametry i struktura toru sterowanego i jego modelu są identyczne.

Dalsze badania polegały na ocenie wpływu dokładności parametrow modelu toru sterowanego w stosunku do parametrów toru rzeczywistego. Na rys. 5 przedstawiono przykładowo dwa przebiegi regulacji:

- pierwszy odpowiada zgodnym parametrom toru sterowanego i jego modelu (linia ciągła),
- w drugim natomiast parametry modelu procesu skrawania różnią się o 50% w stosunku do parametrów procesu skrawania w torze sterowanym (linia przerywana).

W tym drugim przypadku czas regulacji (przy wzroście wzmocnienia z $g_o \rightarrow 2g_o$) wzrósł prawie o 100%, a ponadto pojawiły się znaczne przeregulowania.



Rys. 5 Przebieg regulacji przy skokowej zmianie zakłócenia g_0 uzyskany z badań analogowych

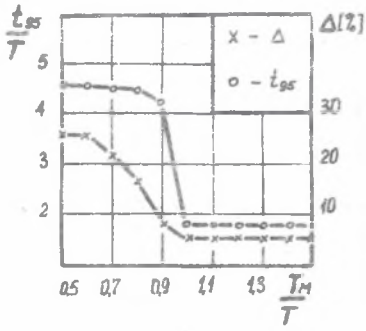
Fig. 5 Transient of jumping disturbance g_0 as a result of the analog research

W celu oceny jakości przebiegów regulacyjnych wprowadzono dwa wskaźniki kryterialne: czas regulacji i przeregulowanie. Na rys. 6 przedstawiono zbiorcze wyniki badań wpływu stałej czasowej T_M*) w modelu procesu skrawania na wymienione wskaźniki kryterialne. Z wykresu tego można wnioskować, że jeżeli stała czasowa T_M w modelu procesu skrawania jest większa

*) T_M jest stałą czasową członu oscylacyjnego, który uzyskuje się z równania (2) po rozwinięciu e^{-sT} w szereg Pade'a.

od stałej czasowej T w rzeczywistym procesie skrawania, to przebiegi regulacyjne nie ulegają istotnym zmianom. Natomiast sytuacja jest zupełnie odwrotna kiedy $T_M < T$. Wówczas bowiem następuje znaczne pogorszenie przebiegów regulacyjnych (wskaźniki kryterialne wzrastają nawet o kilkaset procent).

Uwaga: Czas regulacji t_{95} wyrażony jest liczbą obrotów wrzeciona. Wyznaczany był jako czas, po którym wielkość regulowana osiągała 95% wartości ustalonej.



Rys. 6 Wpływ stałej czasowej T_M modelu procesu skrawania na czas regulacji t_{95} i przeregulowanie

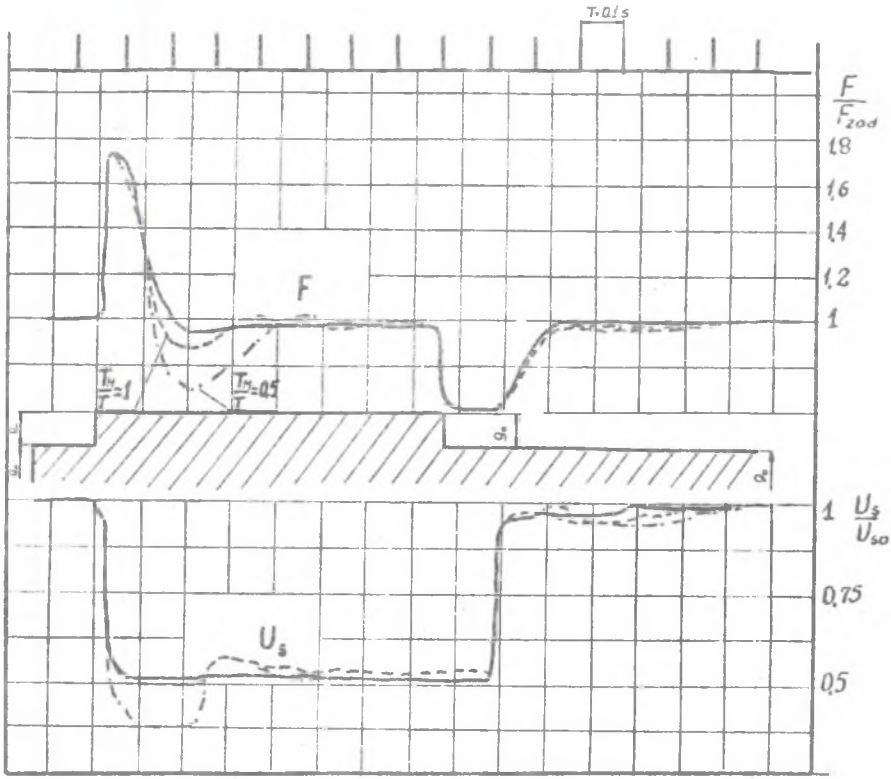
Fig. 6 Influence of the time constant T_M of the model cutting process on the time regulation t_{95} and over-regulation

Dalsze badania polegały na stopniowym upraszczaniu struktury modelu sterowanego. Na rys. 7 przedstawiono przykładowo dwa przebiegi regulacyjne:

- kiedy model toru sterowanego jest identyczny z torem sterowanym (linia ciągła),
- kiedy model toru sterowanego jest uproszczony w stosunku do toru sterowanego (model procesu skrawania został zastąpiony elementem inercyjnym I rzędu - linia przerywana).

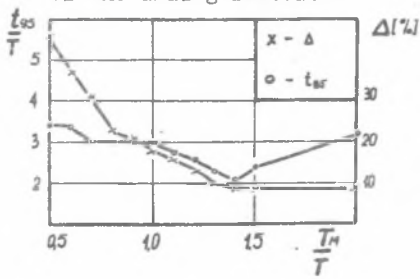
W tym drugim przypadku obserwujemy pogorszenie przebiegów regulacyjnych, ponieważ czas regulacji uległ wydłużeniu prawie o 100%, a ponadto pojawiły się oscylacje.

Na rys. 8 przedstawiono zbiorcze zestawienie ujmujące wpływ stałej czasowej T_M uproszczonego modelu procesu skrawania na wskaźniki regulacji. Obserwuje się występowanie ekstremum, które wypada dla $T_M/T \approx 1,4$. Dla takich parametrów modelu procesu skrawania wskaźniki regulacyjne nie różnią się zasadniczo od przedstawionych na rys. 6.



Rys. 7 Przebieg regulacji przy skokowej zmianie zakłócenia g_o dla różnych wartości T_M/T uzyskany z badań analogowych

Fig. 7 Transient of jumping disturbance g_o for different T_M/T as result of the analog research



Rys. 8 Wpływ stałej czasowej T_M uproszczonego modelu procesu skrawania na czas regulacji t_{95} i przeregulowanie

Fig. 8 Influence of the time constant T_M of the simplified cutting process model on the time regulation t_{95} and over-regulation

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono podejście do zagadnienia optymalizacji struktury i parametrów układu sterowania adaptacyjnego przy wykorzystaniu modelowania na maszynie analogowej. Układ sterowania adaptacyjnego ACC dla obrabiarek jest na tyle złożoną strukturą, że nie ma innej drogi do optymalizacji jego struktury i parametrów niż symulacja analogowa lub cyfrowa.
Technika modelowania analogowego zasadniczo wypierana jest przez modelowanie cyfrowe. Posiada jednak pewne zalety (szybka i łatwa zmiana nastaw parametrów, stosunkowo szybkie modelowanie, o ile schemat nie jest zbyt złożony), które w pewnych przypadkach mogą przeważyć zalety modelowania cyfrowego.

Przedstawiony model analogowy układu sterowania adaptacyjnego jest na tyle uniwersalny, że pozwala na badania zachowania się układu w różnych warunkach i przy bardzo szerokiej gamie parametrów. Pozwala na ocenę przebiegów regulacji dla różnych stopni uproszczeń struktury sterownika, jak również na ocenę wpływu niedokładności nastaw.

Na bazie przedstawionej symulacji analogowej zaprezentowane zostały pewne wnioski o charakterze ogólnym, a dotyczące możliwości uproszczenia struktury sterownika. Wnioski te zostały w dalszych badaniach wykorzystane do zbudowania prototypu układu sterowania adaptacyjnego. Badania eksperymentalne tego prototypu potwierdziły słuszność wniosków z badań analogowych.

7. LITERATURA

[1] Kosmol J. i inni: Model wytaczania dla potrzeb sterowania adaptacyjnego. Materiały z Seminarium AC, Rydzyna 1983.

[2] Schenke L.: Auslegung einer technologisch-geometrischen Grenzregelung für die Fräsbearbeitung. Springer Verlag, 1979.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА АНАЛОГОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

Р е з ю м е

В статье представлен метод аналогово симмулирования адаптивного управления станками. Представлены математические модели функциональных блоков регулировочного контура как: двигатель, датчик, процесс резания, система цифрового управления и структура адаптивного командоконтроллера. Предложено

блоксхему на аналоговую вычислительную машину, которая подробно отражает действительную систему адаптивного управления, а также упрощенную систему. Эти системы разрешают оптимизировать структуру и параметры командоконтроллера методом симмулирования на аналоговой вычислительной машине. Представлены также результаты аналоговых исследований системы адаптивного управления и выводы касающиеся возможности упрощения структуры адаптивного командоконтроллера.

MODELLING THE ADAPTIVE CONTROL SYSTEM WITH THE USE OF THE ANALOG COMPUTER MA-48

S u m m a r y

A method of the analog simulation of the Adaptive Control System for machine tools has been presented in the paper. There have been mathematical models of functional elements of automatic control systems as motor, sensor, cutting process and numerical control system.
There has been a structure of adaptive controller too. An analog computer block diagram of the adaptive control system has been offered in the paper.
It showed faithfully the real control system. There has been a simplified block diagram presented too. This diagram with analog computer simulation methods enabled the optimization of the structure and parameters of the adaptive controller.
The results of analog computer research of Adaptive Control System have been presented in the paper.
There have been conclusions presented concerning simplification of the structure of the adaptive controller.