

Jan KOSMOL, Tadeusz TYRLIK

DYNAMICZNA OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW OBRÓBK NA DRODZE STEROWANIA ADAPTACYJNEGO

Streszczenie. Omówiono przesłanki techniczno-ekonomiczne stosowania układów sterowania adaptacyjnego dla obróbki zgrubnej oraz problem wyboru parametrów regulacyjnych - wielkości mierzonych i nastawianych w układzie sterowania adaptacyjnego.

1. WSTĘP

Dobór optymalnych parametrów skrawania w przypadku obróbki zgrubnej na obrabiarkach konwencjonalnych (bez sterowania adaptacyjnego) wynika najczęściej z kryterium minimalnego kosztu zabiegu (operacji) lub maksymalnej wydajności obróbki. Takie wskaźniki przyjmuje się również jako kryteria dla wyboru parametrów skrawania na obrabiarkach ze sterowaniem adaptacyjnym [1,2,3].

Wyposażenie obrabiarek w automatyczne układy wyboru parametrów skrawania pozwala na dynamiczną ich optymalizację, adekwatną do aktualnego stanu procesu skrawania. Powstaje jednak zagadnienie wyboru wskaźników kryterialnych i parametrów regulacyjnych oraz strategii ich zmian, który pozwoli zrealizować zamierzony cel (minimalny koszt zabiegu lub maksymalną wydajność).

2. ZWIĄZKI POMIĘDZY KOSZTEM ZABIEGU A PARAMETRAMI SKRAWANIA

Koszt wykonania zabiegu K_{zab} związany z pracą obrabiarki, jej obsługi i narzędzia wynosi:

$$K_{zab} = k_1 \cdot t_m + K_{ZN} + K_s, \quad (1)$$

gdzie:

k_1 - koszt minuty pracy obrabiarki i jej obsługi (zł/min)

K_{ZN} - koszty związane z wymianą stępionego narzędzia przypadające na zabieg (zł)

t_m - czas maszynowy zabiegu (min)

K_s - koszty stałe, niezależne od warunków skrawania (zł).

W nowoczesnych obrabiarkach sterowanych numerycznie czasy związane z dobiegiem narzędzia i jego ruchem powrotnym są małe w stosunku do czasu skrawania t_s , gdyż ruchy te odbywają się z przesuwem szybkim, przekraczającym już 10 m/min. Takie założenie pozwala utożsamiać czas maszynowy t_m z czasem skrawania t_s :

$$t_m \approx t_s/60. \quad (2)$$

Koszty K_{ZN} związane z pracą narzędzia przypadające na zabieg można wyrazić jako:

$$K_{ZN} = K_{zm} \cdot Z, \quad (3)$$

gdzie:

K_{zm} - koszty narzędziowe przypadające na okres trwałości narzędzia (zł)
 Z - wykorzystanie trwałości ostrza, przypadające na zabieg.

Wykorzystanie trwałości ostrza Z można wyrazić następująco:

$$Z = \int_0^L \frac{dt}{60 \cdot T}, \quad (4)$$

gdzie:

T - okres trwałości ostrza (min).

Parametry skrawania v i p dla obróbki z udziałem układu sterowania adaptacyjnego są funkcją położenia narzędzia względem przedmiotu. Wówczas czas skrawania można wyrazić następująco:

$$t_s = \int_0^L \frac{d(x) \cdot 60 \cdot \pi}{v(x) \cdot p(x) \cdot 1000} \cdot dx, \quad (5)$$

gdzie:

$v(x)$, $p(x)$, $d(x)$ - szybkość skrawania, posuw i średnica skrawania w funkcji położenia x

L - długość przedmiotu obrabianego (mm).

Uwzględniając w zależności (1) związki (2), (3), (4), (5) oraz fakt, że pomiędzy szybkością skrawania $v(x)$, posuwem $p(x)$, współrzędną x i czasem t zachodzi związek:

$$dx = \frac{1000}{60 \cdot \pi \cdot d(x)} \cdot p(x) \cdot v(x) \cdot dt \quad (6)$$

otrzymano ostatecznie

$$K_{zab} = \frac{\pi}{1000} \int_0^L \left(\frac{k_1 \cdot d(x)}{p(x) \cdot v(x)} + \frac{K_{zm} \cdot d(x)}{p(x) \cdot v(x) \cdot T} \right) \cdot dx + K_s. \quad (7)$$

3. OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW SKRAWANIA

Zagadnienie optymalizacji parametrów skrawania sprowadza się do znalezienia minimum funkcjonału (7). Poszukiwane są postacie funkcji $p(x)$ i $v(x)$, tzw. ekstremalie oraz związki pomiędzy nimi.

Warunkiem koniecznym istnienia ekstremum funkcjonału (7) są równania Eulera w postaci:

$$\frac{\partial K_{zab}}{\partial v(x)} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial K_{zab}}{\partial p(x)} = 0. \quad (9)$$

Po zróżniczkowaniu i po przekształceniach uzyskano:

$$\int_0^L \left(k_1 + \frac{K_{zab}}{T} + \frac{K_{zab}}{T^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial v(x)} \right) \cdot \frac{d(x)}{p(x) \cdot v(x)} \cdot dx = 0, \quad (10)$$

$$\int_0^L \left(\frac{k_1 + \frac{K_{zab}}{T}}{p(x)} + \frac{K_{zab}}{T^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial p(x)} \right) \cdot \frac{d(x)}{p(x) \cdot v(x)} \cdot dx = 0. \quad (11)$$

Rozwiązanie układu równań (10), (11) uwarunkowane jest postacią funkcji $T = T(v, p)$.

W teorii skrawania najpowszechniej spotykana jest potęgowa postać funkcji T , a mianowicie:

$$T = \frac{C_T}{v^s \cdot p^{a_T} \cdot g^{e_T}}, \quad (12)$$

gdzie:

C_T, s, a_T, e_T - wartości stałe.

Wyznaczając pochodną cząstkową:

$$\frac{\partial T}{\partial v} = \frac{C_T}{v^s \cdot p^{a_T} \cdot g^{e_T}} \cdot e_T \cdot \frac{(-s)}{v} = -s \cdot \frac{T}{v} \quad (13)$$

oraz uwzględniając zależność (10) uzyskano równanie ekstremali w postaci:

$$\int_0^L \left[k_1 + \frac{K_{zab}}{T} \cdot (1-s) \right] \cdot \frac{d(x)}{p(x) \cdot v^2(x)} \cdot dx = 0 \quad (14)$$

Rozwiązanie tego równania przyjmuje postać:

$$T = T(v) = \frac{K_{zm}}{k_1} \cdot (s-1). \quad (15)$$

Wyznaczając pochodną oszatkową:

$$\frac{\partial T}{\partial c} = \frac{C_T}{v^s \cdot p \cdot u_T \cdot e_T} \cdot \frac{(-u_T)}{p} = -u_T \cdot \frac{T}{p} \quad (16)$$

oraz uwzględniając zależność (1) uzyskano równanie ekstremali w postaci:

$$\int_0^L \left[k_1 + \frac{K_{zm}}{T} \cdot (1-u_T) \right] \cdot \frac{d(x)}{p^2(x) \cdot v(x)} \cdot dx = 0. \quad (17)$$

Rozwiązanie tego równania przyjmuje postać:

$$T = T(p) = \frac{K_{zm}}{k_1} \cdot (u_T-1), \quad (18)$$

Równoczesne spełnienie warunków (15) i (18) jest na ogół niemożliwe, ponieważ najczęściej $s \neq u_T$. Najmniejszej wartości funkcjonału (7) należy jednak szukać na ekstremali o postaci (12). Porównanie kosztu zabiegu obliczonego dla $T = T(v)$ i $T = T(p)$ wykazuje [3], że korzystniejszy jest pierwszy przypadek - dla obróbki typowych stali węglowych i żeliwa szarego.

Przeprowadzone rozważania [3] wykazują, że najmniejszej wartości funkcjonału (7) należy szukać na ekstremalii o postaci:

$$v^s(x) \cdot p^{u_T}(x) = \frac{C_T}{T(v) \cdot e_T}. \quad (19)$$

Dla obróbki materiałów, dla których $s > u_T$, należy przyjmować jak największe wartości posuwu [3], a szybkość skrawania "dopasowywać" odpowiednio, zachowując warunek (19). Wówczas bowiem funkcjonał (7), osiąga swoją wartość najmniejszą.

4. OGRANICZENIA W UKŁADZIE OUPN JAKO KRYTERIUM WYBORU POSUWU

W punkcie 3 stwierdzono, że proces skrawania należy prowadzić z możliwie maksymalnym posuwem. O jego wartości decydują ograniczenia w układzie OUPN oraz ograniczenia technologiczne. Wpływają one przede wszystkim z wytrzymałości i sztywności urządzeń mechanicznych, z zainstalowanych mocy napędowych, z kształtu wióra, żądanej jakości powierzchni.

4.1. Czynniki ograniczające ze strony narzędzia

4.1.1. Określona wytrzymałość trzonka noża

Dla określonego narzędzia czynnikiem ograniczającym będzie siła na ostrzu noża P_N zgodna z kierunkiem obwodowej siły skrawania.

4.1.2. Określona wytrzymałość płytki ostrzowej

Dla określonej płytki ostrzowej czynnikiem ograniczającym jest możliwość wykruszenia się lub wyłamania ostrza.

W praktyce najczęściej [4] miarą tego ograniczenia jest maksymalny posuw p_{pi} dla danej płytki.

4.2. Czynniki ograniczające ze strony obrabiarki

4.2.1. Określona wytrzymałość i sztywność łożyska kinematycznego napędu głównego

Dla określonego napędu głównego miarą tego ograniczenia może być maksymalny moment obrotowy na wrzecionie M_{NG} lub odpowiadająca mu obwodowa siła na ostrzu noża P_{NG} .

4.2.2. Określona wytrzymałość napędu posuwowego

Dla określonego napędu posuwowego miarą tego ograniczenia może być maksymalna siła w kierunku posuwowym P_{Nx} .

4.3. Czynniki ograniczające ze strony uchwytu przedmiotowego

Dla określonego sposobu mocowania przedmiotu miarą tego ograniczenia może być moment obrotowy M_{uch} przenoszony przez uchwyt lub odpowiadająca mu obwodowa siła P_{uch} .

4.4. Czynniki ograniczające ze strony przedmiotu obrabianego

Dla określonego przedmiotu obrabianego i sposobu jego mocowania miarą tego ograniczenia może być maksymalna strzałka ugięcia przedmiotu i odpowiadająca jej siła w kierunku odporowym P_{fy} .

4.4.1. Żądana gładkość przedmiotu obrabianego

Dla obróbki zgrubnej i określonego narzędzia miarą tego ograniczenia może być maksymalny posuw p_{μ} .

5. WYZNACZENIE ZAŁOŻEŃ DLA AUTOMATYCZNEGO WYBORU POSUWU NA TOKARCE ZE STEROWANIEM ADAPTACYJNYM

Analiza czynników ograniczających podczas obróbki zgrubnej wykazała, że: - większość z nich można sprowadzić do postaci siły P_u , związanej z maksymalną obwodową siłą skrawania P_{zmax} , następująco:

$$P_{zmax} \leq P_u, \quad (20)$$

gdzie:

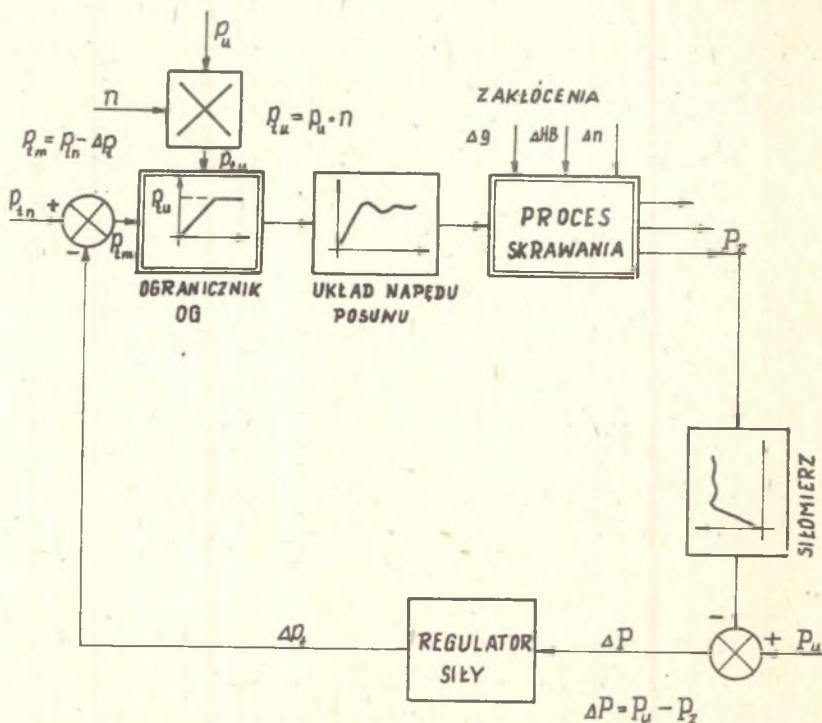
$$P_u = \text{minimum} [P_N, P_{NG}, P_{Nz}, P_{uch}, P_{fz}] \quad (21)$$

P_{Nz} - odpowiednik siły P_{Nx}

P_{fz} - odpowiednik siły P_{fy}

- ze względu na wytrzymałość płytki ostrzowej i żadaną gładkość powierzchni nie należy przekraczać posuwu p_u , określonego następująco:

$$p_u = \text{minimum} [p_{p1}, p_{\mu}]. \quad (22)$$



Rys. 1

p_{tu} - prędkość posuwowa odpowiadająca posuwowi p_u , p_{tn} - prędkość posuwowa odpowiadająca nominalnemu posuwowi p_n , p_{tm} - maksymalna prędkość posuwowa odpowiadająca maksymalnemu (w danej chwili) posuwowi, Δp - przyrost prędkości posuwowej odpowiadający posuwowi Δp , n - prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy obwodu wyboru maksymalnego posuwu na tokarce ze sterowaniem adaptacyjnym. Jest to automatyczny obwód regulacyjny z obwodową składową siły skrawania P_z jako wielkością regulowaną oraz prędkością posuwową p_t jako wielkością nastawianą. W obwodzie występuje ogranicznik OG dla ustawienia posuwu p_u z uwagi na chropowatość powierzchni i wytrzymałość płytki. Obiektem regulacji jest proces skrawania, na który oddziałują zakłócenia w postaci wahań przekroju warstwy skrawanej, skrawalności materiału, prędkości obrotowej przedmiotu.

6. WYZNACZENIE ZAŁOŻEŃ DLA AUTOMATYCZNEGO WYBORU SZYBKOŚCI SKRAWANIA NA TOKARCE ZE STEROWANIEM ADAPTACYJNYM

W punkcie 3 wykazano, że spełnienie warunku najmniejszego kosztu zabiegu lub maksymalnej wydajności wymaga odpowiedniego korygowania szybkości skrawania. W warunkach permanentnych wahań parametrów skrawania wywołanych niestalością cech przedmiotu (niestalość naddatku, niejednorodność materiałowa) korekta szybkości skrawania powinna iść w kierunku zachowania stałości okresu trwałości. Jeżeli związek pomiędzy okresem trwałości T i parametrami skrawania posiada postać (12), to po wystąpieniu odchylenia głębokości skrawania o Δg od głębokości nominalnej g , szybkość skrawania należy skorygować o Δv wg następującej zależności (3):

$$\frac{\Delta v}{v_e} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta P}{P_n}\right) \frac{u_z - (u_z / e_z \cdot e_v)}{u_z}} - 1 \approx - (u_z - \frac{u_z}{e_z} \cdot e_v) \cdot \frac{\Delta P}{P_n}, \quad (23)$$

gdzie:

- Δp - przyrost posuwu niezbędny do zlikwidowania błędu regulacji siły skrawania wskutek odchyłki Δg głębokości skrawania
- v - niezbędna wartość zmiany szybkości skrawania w stosunku do szybkości ekonomicznej v_e wskutek wystąpienia odchyłki Δg głębokości skrawania i przyrostu posuwu Δp
- u_z, e_z - wykładniki potęgowe przy posuwie i głębokości skrawania we wzorach statystyczno-empirycznych na siłę skrawania P_z
- v_e - szybkość skrawania określona dla nominalnych wartości parametrów P_n, ϵ_n
- P_n - nominalny posuw odpowiada nominalnej sile P_u .

Dla typowych stali węglowych obrabianych narzędziami z węglików spiekanych zależność (23) przyjmuje następującą postać:

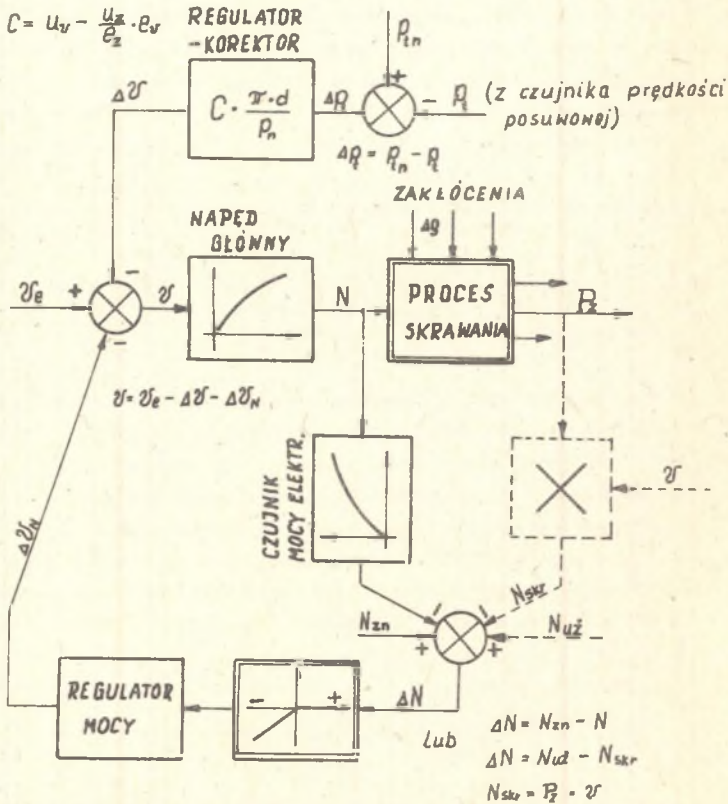
$$\frac{\Delta v}{v_e} = - 0,165 \cdot \frac{\Delta P}{P_n}, \quad (24)$$

a dla żeliwa szarego:

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -0,215 \cdot \frac{\Delta P}{P_n} \quad (25)$$

Zrealizowanie korekcyi szybkości skrawania wg zależności (23) uwarunkowane jest istnieniem wystarczającego zapasu mocy użytecznej obrabiarki. W przypadku jej braku wzrost szybkości skrawania musi być ograniczony. To stwierdzenie pozwala wnioskować, że w układzie wyboru szybkości skrawania powinien znaleźć się automatyczny obwód regulacji mocy skrawania (lub mocy silnika głównego), który działa tylko w przypadku przekroczenia mocy użytecznej obrabiarki (mocy znamionowej silnika).

Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy obwodu wyboru szybkości skrawania. Jest to obwód korekcyjny. W układzie znajduje się ponadto obwód regulacji mocy głównej. Posiada on regulator mocy o nieliniowej charakterystyce statycznej oraz czujnik mocy elektrycznej jako blok sprzężenia zwrotnego.



Rys. 2

N - moc elektryczna silnika głównego, N_{zn} - moc znamionowa silnika głównego, $N_{uż}$ - moc użyteczna obrabiarki, N_{skr} - moc skrawania, Δv_N - przyrost (ujemny) szybkości skrawania w warunkach braku mocy użytecznej, d - średnica skrawania

7. PODSUMOWANIE

Obrabiarka, która ma pracować wg przedstawionej metodyki, powinna być wyposażona dodatkowo w następujące zespoły:

- czujnik obwodowej siły skrawania P_z ,
- regulator siły skrawania,
- ogranicznik OG maksymalnego posuwu,
- czujnik mocy elektrycznej silnika głównego lub mocy skrawania,
- regulator mocy głównej lub mocy skrawania,
- regulator - korektor szybkości skrawania.

Dodatkowo w programie układu sterowania numerycznego obrabiarki powinny się znaleźć następujące informacje:

- wartość zadania siły skrawania P_u ,
- wartość maksymalna posuwu z uwagi na chropowatość powierzchni i wytrzymałość płytki ostrzowej P_u .

LITERATURA

- [1] PRITSCHOW G.: Ein Beitrag zur technologischen Grenzregelung bei der Drehbearbeitung. Praca doktorska, Berlin 1972.
- [2] WINIARSKI A.: Sterowanie adaptacyjne tokarki działające we współpracy z jej układem sterowania numerycznego. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska 1977.
- [3] KOSMOL J.: Analiza i synteza układu sterowania adaptacyjnego procesem toczenia zgrubnego. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska 1979.
- [4] WOŁK R.: Normowanie czasu pracy na obrabiarkach do obróbki skrawaniem. WNT, Warszawa 1972.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОМОЩИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Р е з ю м е

Технико-экономические предпосылки применения систем адаптивного управления для чернового резания. Вопрос выбора регулировочных параметров-измеряемых и настраиваемых величин в системе адаптивного управления.

THE DYNAMICAL OPTIMIZATION OF ROUGH CUTTING PARAMETERS
BY MEANS OF AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM

S u m m a r y

Technical and economical reasons for using of adaptive control system for rough cutting. A problem of regulation parameters selection - manipulated and measured variables in adaptive control system.