ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: AUTOMATYKA z. 54 Nr kol. 650

Wiesław Zapałowicz
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St.Staszica

STEROWANIE PROCESAMI SEKWENCYJNYMI NA PRZYKŁADZIE WALCOWNI

Streszczenie. Walcownię przedstawiono jako system o dwóch poziomach sterowania. Podano ogólną metodę oceny realności planu produkcyjnego oraz propozycję czasowo-optymalnego sterowania sekwencją operacji na niższym szczeblu hierarchii. Wskazano na prostotę wynikającego z rozważań algorytmu obliczeń rozkładu gniotów i prędkości walcowania w poszczególnych operacjach.

1. Wstęp

Każdą walcownię traktować można jako System hierarchiczny. Zadanie produkcyjne w postaci zbioru żądanych ilości poszczególnych rodzajów wyrobów, które różnią się kształtem i wymiarami przekroju poprzecznego, kierowane są do kierownictwa Wydziału a więc nadrzędnego szczebla hierarchii. Tutaj powstaje plan operatywny pracy walcowni, czyli uszeregowanie produkcji poszczególnych wyrobów w czasie. Dla niższego szczebla hierarchii zadania produkcyjne muszą zostać przetłumaczone na sekwencję programów pracy każdej klatki walcowniczej (program gniotów i prędkości). W ten sposób walcownia staje się Systemem o charakterze podwójnie sekwencyjnym. Charakter ten wynika z konieczności kolejnej realizacji produkcji poszczególnych wyrobów (sekwencja w czasie) oraz kolejnego wykonywania poszczególnych operacji walcowania aż do gotowego wyrobu (sekwencja operacji).

2. Wyższy szczebel hierarchii - realność zadań produkcyjnych.

Ze zbioru $J = \{1,2 \dots j \dots m\}$ asortymentów wyrobów, które mają być produkowane w okresie realizacji planu t_p, wybierzmy asortyment j-ty. Niech ilość tego asortymentu wytworzona w okresie $[t_o, t]$ będzie y_i. Wektor stanu produkcji $\bar{y}$ jest rzędu m.
Bez uszczerbku dla ogólności rozważań możemy założyć $\bar{y}(t_o) = \bar{y}_o = \bar{0}$.

Wprowadźmy pojęcie mocy produkcyjnej z^* walcowni (wielkość skalarna). Niech będzie to ilość ton produktu, możliwa do wytworzenia w przyjętej jednostce czasu (godzinie, zmianie, miesiącu, roku lub tp.), odniesiona do wybranego j-tego asortymentu. Dla każdego innego asortymentu moc produkcyjna walcowni będzie oczywiście na ogół inna. Możemy zatem napisać:

$$\bar{c} = \bar{\beta} z^* \qquad /1/$$

gdzie $\bar{c}$ i $\bar{\beta}$ są wektorami kolumnowymi rzędu m, przy czym zgodnie z założeniem dla wybranego j mamy $\beta_j^* = 1$.
W dalszych rozważaniach gwiazdkę w oznaczeniach pominiemy.
Załóżmy, że w okresie realizacji planu

$$c_j = \text{const} \quad \forall\, j = 1 \ldots m \qquad /2/$$

Zgodnie z przyjętą kolejnością realizacji zamówień, przy uwzględnieniu żywotności poszczególnych wykrojów lub walców sporządzony zostaje harmonogram pracy walcowni, w którym okres planowania t_p podzielony zostaje na pewną liczbę, np. r etapów realizacji planu. W każdym k-tym etapie, proces produkcji może zostać opisany wektorowym równaniem różniczkowym:

$$\bar{y}' = \bar{\gamma}_k, \qquad /3/$$

przy czym zbiorem sterowań dopuszczalnych możliwych do zastosowania w każdym etapie jest $\Gamma = \bar{\gamma}_k$, gdzie $\bar{\gamma}_k = [00 \ldots c_j \ldots 00]^T$.
Dany jest wektor stanu końcowego produkcji:

$$\bar{y}^F = \left[y_1^F\, y_2^F \ldots y_j^F \ldots y_m^F\right]^T, \qquad /4/$$

czyli żądane ilości poszczególnych asortymentów na koniec okresu t_p.
Oznaczmy przez t_j czas niezbędny do wyprodukowania przewidzianej na okres planu t_p ilości j-tego produktu a więc y_j^F. Mamy wtedy:

$$t_j = \frac{y_j^F}{c_j} \quad \text{oraz} \quad \frac{t_j}{t_p} = \alpha_j . \qquad /5/$$

Równanie produkcji /3/, które ważne jest tylko w k-tym etapie, może zostać teraz zastąpione równaniem

$$\bar{y}' = \text{diag}\left\{\alpha_j\right\} \bar{c} = \bar{\eta} \qquad /6/$$

opisującym system fikcyjny, równoważny poprzedniemu, w którym wszystkie rodzaje produktów, wytwarzane są równocześnie, z wydajnością $\eta_j = \alpha_j c_j$, gdzie $0 \leq \alpha_j \leq 1$.

Podprzestrzeń sterowań dopuszczalnych można więc zdefiniować w sposób następujący:

$$H = \left\{\bar{\eta} \in R^m ; \quad 0 \leq \eta_j \leq c_j ; \quad \sum_j^m \frac{\eta_j}{c_j} \leq 1\right\}. \qquad /7/$$

Dla realizacji zadań planowych musi być:

$$\frac{\bar{y}^F}{t_p} \in H . \qquad /8/$$

Czyli wektor średnich żądanych wydajności walcowni musi leżeć wewnątrz podprzestrzeni sterowań dopuszczalnych.

Podobny sposób ujęcia okazuje się szczególnie przydatny w przypadkach gdy jedna z walcowni (np. zgniatacz) obsługuje wsadem kilka innych walcowni.

Jeżeli /8/ nie zachodzi, wtedy istnieje możliwość powiększania podprzestrzeni sterowań dopuszczalnych przez zwiększenie wydajności c_j dla jednego lub kilku asortymentów, np. przez wprowadzenie sterowania czasowo-optymalnego na niższym szczeblu hierarchii.

3. Niższy szczebel hierarchii

Przy produkcji każdego j-tego rodzaju wyrobu, każde pasmo, aby stać się produktem końcowym, musi przejść przez n operacji walcowania prowadzonych w co najmniej jednej a co najwyżej n klatkach walcowniczych. Wprowadzając fikcyjną operację o wskaźniku 0, odpowiadającą dostawie wsadu, otrzymamy równanie stanu systemu:

$$\bar{x}' = \bar{u} \in U \subset W \subset R^{n+1}, \qquad /9/$$

gdzie x_i jest produktem i-tej walcarki w czasie $[t_o, t]$.
Na zmienne stanu narzucone są ograniczenia:

$$A\bar{x} \geq 0 \quad \dim A = n x(n+1), \qquad /10/$$

wynikające z relacji: $a_{i-1}\, x_{i-1} \geq x_i$, gdzie $a_i \leq 1$ jest współczynnikiem uzysku w i-tej operacji. W przypadku gdy pasmo nie jest obcinane między dwiema klatkami odpowiednie $a_i = 1$.

Wielkością wyjściową systemu jest składowa x_n wektora stanu. Jej żądaną wartość końcową oznaczymy przez x_n^F. Sterowanie $\bar{u}$ ma przeprowadzić system ze stanu $\bar{x}_o = [x_{oo}\ 0 \ldots 0]^T$ do stanu końcowego $\bar{x}^f = [x_1^f\ x_2^f \ldots x_n^F]^T$, w którym wszystkie operacje zostały przeprowadzone. Ten stan końcowy definiuje związek

$$A\bar{x}^f = \bar{0}, \qquad /11/$$

przy czym znana jest składowa x_n^F lub x_o^f.
Jeżeli proces prowadzony jest w ten sposób, że każde oddzielne pasmo przechodzi kolejno przez wszystkie operacje, po czym cykl zaczyna się na nowo, wtedy równanie /9/ przechodzi w

$$\bar{x}' = \bar{p}_i, \qquad /12/$$

gdzie

$$\bar{p}_i = [0 \ldots 0\ w_i\ 0 \ldots 0]^T \ \forall\ i = 0,n \cdot \qquad /13/$$

Założmy, że wydajność w_i nie ulega zmianie w trakcie trwania operacji. Przełączenie sterowania (przejście do następnej operacji) następuje wtedy każdorazowo po czasie x_i^f/w_i. Taki sposób pracy występuje np. w walcowniach z jedną walcarką nawrotną. Gdy proces prowadzony jest w kilku klatkach równocześnie w każdej dla innego pasma wtedy

$$\bar{u} = \bar{p}_i + \sum_{I_{i-1}} \bar{p}_j \qquad I_{i-1} = \{0,1\ldots i-1\}, \qquad /14/$$

gdyż niektóre walcarki mogą być "puste" w trakcie procesu.
Wydajność całej walcowni dla każdego asortymentu wynosi:

$$c = \min_i \frac{1}{\sum_{j=0}^{k} \frac{1}{w_{i+j}}}, \qquad /15/$$

gdzie k jest maksymalną liczbą klatek "pustych" między dwiema, w których odbywa się operacja. Jeśli walcowanie odbywa się we wszystkich klatkach:

$$\bar{u} = \sum_i \bar{p}_i = \bar{w}, \qquad /16/$$

zaś wydajność

$$c = \min_i w_i. \qquad /17/$$

Podprzestrzeń W sterowań dopuszczalnych zdefiniowana jest następująco:

$$W = \left\{\bar{w}:\ w_{i\min} \leqslant w_i = \rho F_i v_i \leqslant w_{i\max};\ w_o \leqslant \rho F_o v_1;\quad \bar{\delta} \geqslant B\bar{F} \geqslant 0;\ \dim B = n \times (n+1)\right\}, \qquad /18/$$

przy czym ostatnie ograniczenia wynikają z relacji

$$0 \leqslant F_{i-1} - F_i \leqslant \delta_i, \qquad /19/$$

gdzie ρ - gęstość walcowanego pasma, F_i - powierzchnia jego przekroju poprzecznego, v_i - stała prędkość walcowania w i-tej klatce, $\bar{\delta} = \left[\delta_1 \delta_2 \ldots \delta_n\right]^T$ wektor maksymalnych dopuszczalnych gniotów bezwzględnych.
W przypadku nastawnej prędkości walcowania w każdej klatce jest:

$$W = \left\{\bar{w}:\ (F_{i-1} - \delta_i) v_{i\min} \leqslant w_i \leqslant w_{i\max} = \rho F_{i-1} v_{i\max};\ w_o \leqslant \rho F_o v_{i\max}\right\}. \qquad /20/$$

Znormalizujmy wektor stanu końcowego, przyjmując $x_n^F = 1$.
Warunkiem, aby (n+1) operacyjny proces był realizowalny przy istniejących ograniczeniach oraz definicji /11/, jest istnienie takiej wartości $\vartheta = \frac{1}{t}$, że $\vartheta \bar{x}^f \in W$.
Minimalny czas realizacji zadania produkcyjnego odpowiadający maksymalnej wydajności wynosi:

$$t_{\min} = \frac{1}{\vartheta^*} \quad \text{gdzie} \quad \vartheta^* = \sup\left\{\vartheta > 0:\ \vartheta \bar{x}^f \in W\right\}, \qquad /21/$$

co przy warunku /11/ implikuje ciągłość procesu, zdefiniowaną związkiem

$$A\bar{w} = 0. \qquad /22/$$

Stąd

$$c_{\max} = w_n = \vartheta^* \qquad /23/$$

oraz modyfikacja podprzestrzeni sterowań dopuszczalnych wynikająca z faktu, że prędkości walcowania w kolejnych klatkach powinny tworzyć ciąg monotonicznie rosnący:

$$W = \left\{\bar{w}:\ \rho F_i \max\left[v_{i\min}, v_{(i-1)\max}\right] \leqslant w_i \leqslant \rho F_{i-1} \min\left[v_{i\max}, v_{(i-1)\min}\right];\ v_o \leqslant v_{1\max}\right\}. \qquad /24/$$

Powierzchnia F_n przekroju poprzecznego pasma wychodzącego z ostatniej klatki jest znana. Ze względu na możliwości cięcia nożyc obcinających końce pasma przed wejściem do pierwszej klatki wprowadza się zwykle ograniczenie

$$F_o \leq F_k \cdot \qquad /25/$$

Z powyższych rozważań wynika prosty algorytm obliczeń optymalnego ze względu na wydajność rozkładu gniotów i prędkości w poszczególnych walcarkach. Punktem wyjścia jest zgodnie z /23/:

$$w_{n\,max} = \rho F_n v_{n\,max} \cdot$$

Biorąc pod uwagę δ_n wyznacza się v_{n-1} za pomocą /22/. Jeżeli warunek /24/ dla w_{n-1} nie jest spełniony ($v_{n-1} > v_{(n-1)max}$), przyjmuje się $v_{n-1} = v_{(n-1)max}$, po czym następuje korekta wstecz wartości v_n itd. W ten sposób prowadzona procedura doprowadza do wartości F_o. Jeżeli okaże się, że $F_o > F_k$, przyjmuje się $F_o = F_k$, po czym procedurę się powtarza.
Jeżeli okaże się, że warunek /24/ dla którejkolwiek w_i nie może być spełniony, oznacza to, że przy istniejących ograniczeniach proces nie jest możliwy do przeprowadzenia w n operacjach.

Przedstawiona metoda wykorzystana została nie tylko do wyznaczani optymalnego punktu pracy ale również w zagadnieniach modernizacyjnych jednej z walcowni.

LITERATURA

[1] Sawik T., Zapałowicz W.: O minimalno-czasowym sterowaniu procesem produkcji wieloasortymentowej. Materiały III Sympozjum P.T.C. 1976.

[2] Zapałowicz W.: Optimale Steuerung der Warmbandstrasse. Technische Tagen der Hochschule Otto v.Guericke Magdeburg NRD. 1978 - Referat.

[3] Zapałowicz W.: Sterowanie optymalne sekwencyjnych procesów technologicznych w hutnictwie. VIII K.K.A. Szczecin 1980.

УПРАВЛЕНИЕ ПОРЯДКОМ ОПЕРАЦИЕЙ НА ПРИМЕРЕ ПРОКАТКИ

Р е з ю м е

Предлагается новый подход к проблеме оптимизации программы обжатки и скорости прокатки в последовательным процессе. Прокатное производство считается как имеющее два близко связанные управления. Проблема была решена как проблема управления за минимальное время с ограничениями. Процесс считается динамическим и управления состояния формулировано как линейные, инвариянтные. Простой алгоритм позваляет использовать вычислительную машину для симилирования существующего, модернизированного или новостроенного процесса.

THE SEQUENTIAL PROCESSES CONTROL WITH THE ROLLING MILL BEING AN EXAMPLE

S u m m a r y

In the paper the new approach to the problem of optimization of the reduction and speed schedule in the sequential rolling process has been presented. The rolling mill was considered as the one having two closely connected levels of control but the problem has been solved as the time-optimal control problem with constraints. The process was assumed to be dynamic and the state equations were formulated as the linear and time invariant. The simple algorithm enables the computer simulation of the rolling process in the existing, modernized and constructed rolling mills.