ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992

Seria: AUTOMATYKA z. 110 Nr kol. 1176

Danuta Rasztabiga

Politechnika Śląska

STEROWANIE OPERATYWNE PROCESU WALCOWANIA

THE COMPETENT CONTROL OF ROLLING PROCESS

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРОКАТА

Streszczenie: W referacie przedstawiono problem sterowania Elastyczną Linią Walcowniczą (ELW) z wejściem probabilistycznym. Na wejściu i wyjściu ELW znajdują się magazyny buforowe, do których w losowych chwilach czasu losowo dopływa wsad do ELW oraz losowo pobierane są wyroby z magazynów buforowych. Dla tak sformułowanego problemu przedstawiono model symulacyjny ELW i heurystyczne algorytmy sterowania operatywnego procesem walcowania. Celem sterowania ELW dla takiego problemu jest minimalizacja strat wynikających z braku wyrobów w magazynach buforowych i przestoju dalszych agregatów.

Summary: The paper presents a problem of Flexible Rolling Line (FRL), (FRL with the probabilistic input) control. Buffer stores are placed at the entry and the exit of the FRL. These stores are of unlimited capacity. It is assumed that random lots of charges are delivered to the FRL at random instants of time. This problem presents a simulation model and heuristical algorithms of competent control of the rolling process. In the case of the FRL, decision variables for rolling process and roll replacement are distinguished which determine the sequences and product range for certain charge and the choice of unit in which roll replacement is required.

Резюме: В статье представлена проблема управления Гибкой Прокатной Линией (ГПЛ) со случайным входом. На входе и выходе линии находятся буферные магазины, к которым в случайное время входит всад а также случайным образом принимаются изделия. Для так сформулированной проблемы дана имитационная модель линии и эвристические алгоритмы оперативного управления процессом вальцовки. Целью управления линией есть минимизация затрат в случае нехватки изделий в буферных магазинах и простаивания дальнейших агрегатов.

1. Wprowadzenie

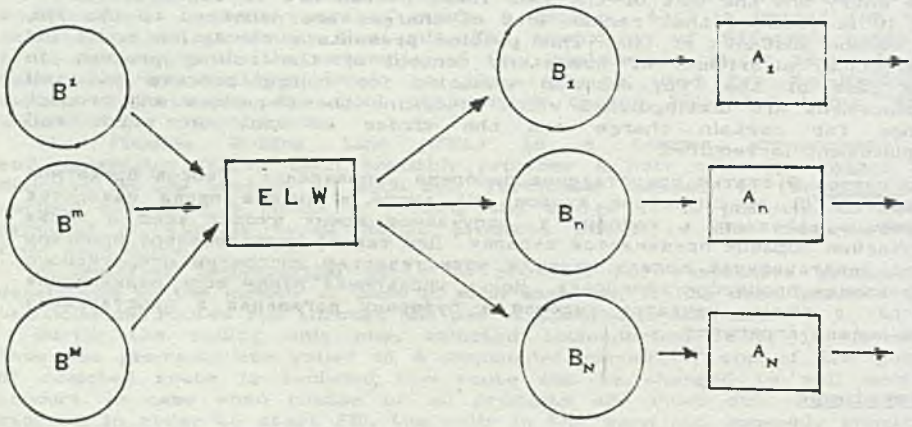
Elastyczna Linia Walcownicza (ELW) umożliwia produkcję różnych asortymentów wyrobów. Dla każdego asortymentu wymagane jest odpowiednie narzędzie w każdym agregacie ELW. Produkcja wyrobów różnych asortymentów wiąże się z koniecznością wymiany zużytych narzędzi. Wymiana narzędzi powoduje przestoje ELW, co zmniejsza efektywność jej pracy. Zakłada się, że narzędzia są wielofunkcyjne, tzn., że mogą być wykorzystywane do produkcji wyrobów różnych asortymentów.

Na ELW można wyróżnić jako formy sterowania harmonogramowanie oraz sterowanie operatywne. Wybór formy sterowania jest zależny od kompletności danych w rozpatrywanym przedziale czasu. Jeżeli dane są kompletne, to można wyznaczyć harmonogram.

W procesie dyskretnym rozpatrywanym w określonym przedziale czasu strumienie obiektów dostarczonych na ELW na ogół nie są znane (tzn. nie są znane typy obiektów lub chwile ich dostępności). Znany jest jedynie stan początkowy ELW. W takim przypadku należy stosować sterowanie operatywne.

Sterowanie takie polega na podejmowaniu decyzji w chwili istotnej, w zależności od rzeczywistego stanu ELW. Chwilą istotną w sterowaniu jest chwila, w której należy podjąć decyzję o asortymencie walcowanego produktu lub konieczności przeprowadzenia wymian określonych narzędzi.

Dla problemu sterowania operatywnego ELW zakłada się, że do ELW są dostarczane w losowych chwilach czasu losowe partie wsadu. Na wejściu i wyjściu ELW znajdują się magazyny buforowe. Magazyny te mają nieograniczoną pojemność. Zapasy wsadu w magazynie buforowym uzupełniane są przez stały w czasie strumień masy wsadu. Produkty z ELW są przekazywane porcjami do dalszych agregatów. Agregaty te powinny pracować w sposób ciągły. Dla zapewnienia ciągłości pracy agregatów zlokalizowano przed nimi magazyny buforowe dla odpowiednich produktów (rys.1). W każdym magazynie buforowym może znajdować się produkt jednego typu. Brak produktu powoduje określone straty produkcyjne. Równoczesna produkcja różnych asortymentów w ELW powoduje konieczność wymiany narzędzi i przestoju ELW.



Rys.1. Elastyczna Linia Walcownicza

(A_n - n-ty agregat, B_n - n-ty magazyn buforowy, B^m -m-ty magazyn wsadu, N - liczba agregatów (magazynów buforowych lub produktów), M - liczba typów wsadu)

Fig.1. Flexible Rolling Line

(A_n - n-th aggregate, B_n - n-th store, B^m - m-th input store; N - number of aggregates (stores or produkts), M - number of charge types)

Celem sterowania ELW dla takiego problemu jest minimalizacja strat wynikających z braku wyrobów w magazynach buforowych i przestoju dalszych agregatów.

W referacie przedstawiono problem sterowania operatywnego, dla którego wyprowadzono model symulacyjny ELW i heurystyczne algorytmy sterowania procesem walcowania. Model matematyczny zawiera zmienne decyzyjne dotyczące

sekwencji produkcji określonego asortymentu oraz wymiany narzędzi określonych agregatów.

Dla ELW wyróżnia się zmienne decyzyjne procesu walcowania oraz wymiany walców, określające sekwencje i wielkość asortymentu produktu dla określonego wsadu oraz wybór agregatu, w którym należy wymienić walce.

W części I referatu [1] przyjęto podstawowe definicje i założenia dla problemu deterministycznego sterowania ELW. W części II referatu przedstawiono sterowanie, równania stanu,, reguły heurystyczne oraz heurystyczne algorytmy walcowania i wymiany walców.

Przyjęte oznaczenia w części I będą używane w części II. Odsyłacze do części I oznaczono np. [I.20], co oznacza wzór 20 w części I.

2. Podstawowe założenia i określenia

Przyjmiemy oznaczenia i definicje 1 - 12 oraz założenia opisane w części I [I.2- I.20b]:

m - liczba typów wsadu (m=1,...,M),

n - liczba typów produktu (n=1,...,N),

i - liczba złożeń walców (i=1,...,I),

j - max. liczba wykrojów na złożeniu walca ($j=1,\dots,J_i$),

k - numer etapu decyzyjnego (k=1,...,K),

Załóżmy, że ELW składa się z I złożeń. Na i-tym złożeniu (i=1,...,I), znajduje się J_i różnych wykrojów. Przyjmiemy, że:

$$J = \max_{1 \le i \le I} J_i \tag{I.1}$$

Definicja 1: Strukture ELW przedstawia macierz:

$$C = [\, c_{i,j} \,] \qquad i=1,\dots,I \quad j=1,\dots,J \tag{I.2}$$

Definicja 2: Relację przyporządkowania typu produktu do wsadu opisuje macierz:

$$R = [\, r_{m,n} \,] \qquad m=1,\dots,M \quad n=1,\dots,N \tag{I.3}$$

Definicja 3: Marszruty technologiczne linii opisuje macierz:

$$\Lambda = \left[\, \lambda_{i,n} \,\right] \qquad i=1,\dots,I \quad n=1,\dots,N \tag{I.4}$$

Definicja 4: Zamówienie produktów jest macierzą:

$$Z^k = \left[\, z^k_{m,n} \,\right] \qquad n=1,\dots,N \tag{I.5}$$

Definicja 5: Wydajności linii są dane w wektorze:

$$W = \left[\, w_n \,\right] \qquad n=1,\dots,N \tag{I.6}$$

Definicja 6: Czasy wymian złożeń dane są w wektorze:

$$T = [\, \tau_i \,] \tag{I.7}$$

Definicja 7: Nominalne wymiary wykrojów opisuje macierz:

$$D = [\, d_{i,j} \,] \qquad i=1,\dots,I \quad j=1,\dots,J \tag{I.8}$$

Definicja 8: Dopuszczalne wymiary wykrojów opisuje macierz:

$$G = \left[\epsilon_{i,j} \right] \qquad \begin{matrix} i=1,\dots,I \\ j=1,\dots,J \end{matrix} \tag{I.9}$$

Definicja 9: Tolerancję zużycia wykrojów opisuje macierz:

$$E = \left[e_{i,j} \right] \qquad \begin{matrix} i=1,\dots,I \\ j=1,\dots,J \end{matrix} \tag{I.10}$$

Definicja 10: Stanem linii jest macierz:

$$X^k = \left[x^k_{i,j} \right] \qquad \begin{matrix} i=1,\dots,I \\ j=1,\dots,J \end{matrix} \tag{I.11}$$

Definicja 11: Przepustowość ELW jest macierzą:

$$P = \left[p^k_{i,j} \right] \qquad \begin{matrix} i=1,\dots,I \\ j=1,\dots,J \end{matrix} \tag{I.12}$$

Definicja 12: Przepustowość marszruty technologicznej produktów opisuje wektor:

$$P_n = \left[p^k_{m,n} \right] \qquad n=1,\dots,N \tag{I.13}$$

Definicja 13: Pojemności magazynów buforowych przed agregatami są zapisane w wektorze:

$$B = \left[b_n \right] \qquad n=1,\dots,N \tag{1}$$

gdzie: b_n - pojemność magazynu buforowego n-tego produktu (przed agregatem A_n).

Definicja 14: Wydajności ELW oraz agregatów dla poszczególnych produktów są zapisane w macierzy:

$$V = \left[v_{n,l} \right] \qquad \begin{matrix} n=1,\dots,N \\ l=1,2 \end{matrix} \tag{2}$$

gdzie: $v_{n,1}$ - wydajność n-tego agregatu,

$v_{n,2}$ - wydajność ELW dla n-tego produktu.

Wydajność jest rozumiana jako liczba ton materiału obrabianego w jednostce czasu.

Przyjmiemy, że wydajności spełniają warunek:

$$\forall_{1 \le n \le N} \quad w_{n,1} < w_{n,2} \tag{2a}$$

Definicja 15: Straty jednostkowe przestojów agregatów dane są w wektorze:

$$H = \left[h_n \right] \qquad n=1,\dots,N \tag{3}$$

gdzie: h_n - strata przestoju n-tego agregatu w jednostce czasu.

Definicja 16: Zapas wsadu po k-tej operacji opisany jest wektorem:

$$S^k = \left[s^k_m \right] \qquad m=1,\dots,M \tag{4}$$

gdzie: s^k_m - zapas wsadu m-tego typu.

Przyjmiemy, że w procesie walcowania musi być spełniony warunek:

$$\forall_{1 \le m \le M} \quad u^k_{m-2} \le s^{k-1}_m \tag{4a}$$

Definicja 17: Zapas produktów po k-tej operacji opisany jest wektorem:

$$\varphi^k = \left[\varphi^k_n \right] \qquad n=1,\dots,N \tag{5}$$

gdzie: φ^k_n - zapas produktu n-tego typu.

Przyjmiemy, że w procesie walcowania musi być spełniony warunek:

$$\forall_{1 \le n \le N} \quad \varphi^k_n \le b_n \tag{5a}$$

Definicja 18: Jednostkowe dostawy wsadu są opisane wektorem:

$$D = [\ d_m\ ] \qquad m=1,\dots,M \tag{6}$$

gdzie: d_m - dostawa wsadu m-tego typu w jednostce czasu.

Przyjmiemy, że pojemność magazynów buforowych dla wsadu przed ELW nie jest ograniczona.

Z punktu widzenia sterowania operatywnego procesem walcowania istotne znaczenie ma charakterystyka statyczna wykroju [1,4]. Charakterystyka ta określa odległość między powierzchniami walców w wykroju, w zależności od masy przewalcowanego materiału.

Jeżeli j-ty wykrój i-tego walca leży na marszrucie technologicznej dla N_k produktów, które mogą być otrzymane z każdego wsadu, to liczba L wszystkich charakterystyk statycznych wyniesie:

$$L = M \sum_{k=1}^{k=IJ} N_k \tag{7}$$

Charakterystyka statyczna wykroju może mieć przebieg wypukły lub liniowy dla różnych typów wsadu (rys.2a,b).

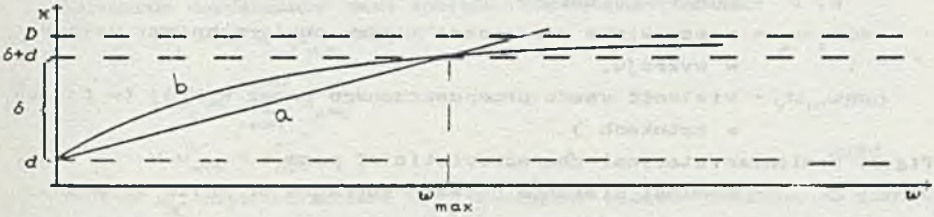


Fig.2a,b. Charakterystyka statyczna wykroju: a - liniowa, b- nieliniowa
(d - nominalna odległość między powierzchniami walców w wykroju,
δ - dopuszczalne zwiększenie odległości między powierzchniami walców w wykroju,
x - rzeczywista odległość między powierzchniami walców w wykroju
ω - wielkość wsadu przepuszczonego przez wykrój (w tonach lub w sztukach)

Fig.2a,b. Statical characteristic of pass: a - linear, b - nonlinear;
(d - nominal distance between surfaces of rolls in a pass,
δ - admissible increase in the distance between roll surfaces in a pass,
x - actual distance between roll surfaces in a pass,
ω - quantity of charge passed through a pass (in tons or pieces)

W wyniku walcowania kolejno ω_n a następnie ω_ν wsadu odpowiednio typu n i ν, otrzymamy w różnym stopniu zużyte wykroje (x_1 - x_4), jeżeli ich charakterystyki statyczne są nieliniowe (rys.3). Ponadto różne są zużycia wykrojów w przypadku walcowania wsadu n lub ν ($\Delta\omega = \omega_n + \omega_\nu$) dla tych samych charakterystyk.

Dla wsadu o liniowych charakterystykach statycznych wykroju walcując kolejno ω_n, a następnie ω_ν wsadu typu n i ν, otrzymamy odległość x_2 zużycia powierzchni wykrojów (rys.4). Jednakże walcując tylko wsad jednego typu ($\Delta\omega = \omega_n + \omega_\nu$) otrzymamy odległość x_3 zużycia powierzchni wykrojów.

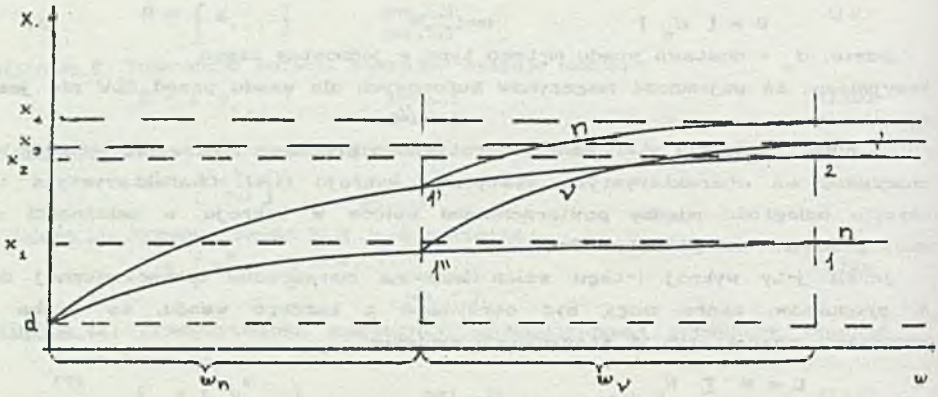


Fig.3. Nieliniowe charakterystyki statyczne wykroju

(d - nominalna odległość między powierzchniami walców w wykroju

n, ν - numery produktów,

x_1-x_4 - rzeczywiste odległości między powierzchniami walców w wykroju,

ω_n, ω_ν - wielkość wsadu przepuszczonego przez wykrój (w tonach, w sztukach).

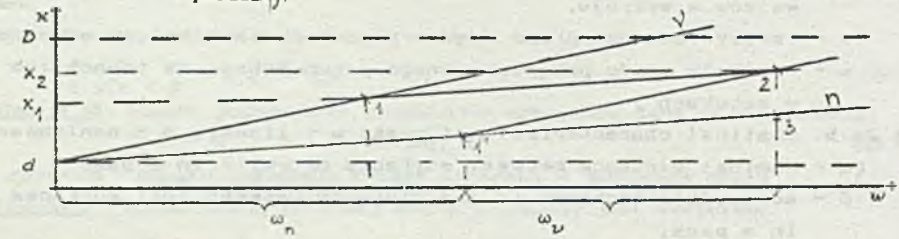
Fig.3. Nonlinear statical characteristic of pass

(d - nominal distance between surfaces of rolls in a pass,

n, ν - produkt numbers,

x_1-x_4 - actual distance between roll surfaces in a pass,

ω_n, ω_ν - quantity of charge passed through a pass (in tons or pieces).



Rys.4. Liniowe charakterystyki wykrojów

(n, ν - numery produktów, ω_n, ω_ν - wielkości produktów,

x_2, x_3 - odległości pomiędzy powierzchniami wykrojów)

Fig.4. Linear characteristic of passes

(n, ν - product numbers, ω_n, ω_ν - quantity of products,

x_2, x_3 - distances between surfaces of passes)

W praktyce przyjmuje się (dla uproszczenia) liniowe charakterystyki wykrojów:

$$x_{i,j} = a_{i,j}\omega_m + e_{i,j} \tag{8}$$

gdzie: $a_{i,j}$, $e_{i,j}$ - stałe współczynniki.

Przyjmując liniową charakterystykę statyczną wykroju można wyznaczyć przepustowość tego wykroju dla n-tego produktu z m-tego wsadu [I.17-I.20b].

3. Sterowanie

Sterowanie polega na podejmowaniu decyzji o produkcji n-tego asortymentu z m-tego wsadu lub wymianie walców.

Definicja 19a: Sterowanie k-tej operacji walcowania jest wektorem:

$$U^k = [\ u_l^k\ ] \qquad l=1,..,M+2 \tag{9}$$

Elementy tego wektora określamy następująco:

u_1^k - typ produktu, który ma być produkowany,

u_2^k - wielkość wyrobu,

u_{m+2}^k - wielkość m-tego wsadu (m=1,...,M).

Sterowanie dopuszczalne musi spełniać następujące warunki:

$$\exists_m\ (u_1^k = n) \Leftrightarrow (p_{m,n}^k > 0) \tag{10}$$

Ponadto

$$u_2^k = \sum_{m=1}^{m=M} u_{m+2}^k \tag{10a}$$

oraz

$$u_{m+2}^k = p_{m,n}^k \tag{10b}$$

Przy wyborze u_2^k, czyli składników u_{m+2}^k występuje problem związany z różnymi charakterystykami statycznymi. Można np. wybierać jeden wsad μ, który spełnia warunek:

$$\max p_{m,n}^k = p_{\mu,n}^k \tag{11}$$

a następnie przyjąć

$$u_{m+2}^k = p_{\mu,n}^k \tag{12}$$

oraz dla $m \neq \mu$

$$u_{m+2}^k = 0 \tag{12a}$$

Definicja 19b: Sterowanie k-tej wymiany walców jest wektorem:

$$Y^k = [\ y_i^k\ ] \qquad i=1,...,I \tag{13}$$

gdzie:

$$y_i^k = \begin{cases} 1, \text{ jeśli i-ty walec ma być wymieniony w k-tej operacji} \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \tag{13a}$$

Czas przestoju ELW podczas wymiany złożeń jest zależny od liczby urządzeń wymieniających złożenia (suwnice lub brygady). Walce mogą być wymieniane równolegle lub sekwencyjnie.

Jeśli walce są wymieniane równocześnie, to czas ich wymiany τ^k obliczymy jako:

$$\tau^k = \max_{1 \le i \le I} y_i \tau_i \tag{14a}$$

Przy wymianie sekwencyjnej otrzymamy:

$$\tau^k = \sum_{i=1}^{i=I} y_i \tau_i \tag{14b}$$

Czas θ^k operacji walcowania wsadu na ELW wyznaczamy ze wzoru:

$$\theta^k = \frac{u^k_z}{w_n} \tag{15}$$

przy czym

$$n = u^k_1 \tag{15a}$$

Oznaczmy przez t^k chwilę zakończenia k-tej operacji ($t^0=0$). Zatem dla operacji walcowania wsadu otrzymamy:

$$t^k = t^{k-1} + \theta^k \tag{16a}$$

a dla operacji wymiany walców:

$$t^k = t^{k-1} + \tau^k \tag{16b}$$

Czas θ^k wyznaczamy z (15), natomiast czas τ^k odpowiednio z (14a) lub (14b).

4. Równania stanu

Załóżmy, że dany jest stan początkowy ELW X^0, zamówienie na produkty Z^k, wydajność ELW i agregatów V. Należy wyznaczyć najkrótszy czas realizacji zamówień.

Równania stanu mają postać:

$$X^k = f\,(X^{k-1}, U^k, Y^k) \tag{17}$$

4.1. Operacja wymiany złożeń

Jeżeli stan X^{k-1} spełnia warunek:

$$\forall_{1 \le n \le N} \left[\min_{1 \le i \le I} (\sigma_{i,\lambda_{i,n}} - x^{k-1}_{i,\lambda_{i,n}} = 0) \wedge (z^{k-1}_{n,m} = 0) \right] \tag{18}$$

to w k-tej operacji następuje wymiana złożeń, czyli:

$$\exists_i \; y^k_i = 1 \tag{19}$$

$$x^k_{i,j} = \begin{cases} d_{i,j}, \text{ dla } y^k_i = 1 \\ x^{k-1}_{i,j}, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{19a}$$

oraz

$$\forall_{1 \le n \le M} \; z^k_{n,m} = z^{k-1}_{n,m} \tag{19b}$$

Ponadto dla sekwencyjnej wymiany walców

$$t^k = t^{k-1} + \sum_{i=1}^{i=I} y^k_i \tau_i \tag{20a}$$

natomiast dla równoczesnej wymiany walców

$$t^k = t^{k-1} + \max_{1 \le i \le I} y^k_i \tau_i \tag{20b}$$

Zapasy wsadu wyznaczamy ze wzoru:

$$s^k_m = s^{k-1}_m + d_m (t^k - t^{k-1}) \quad m=1,\dots,M \tag{21}$$

Zapasy produktów wyznaczamy ze wzoru:

$$\varphi^k_n = \max\,[\,0, \varphi^{k-1}_n - v_{n,z}(t^k - t^{k-1})\,] \tag{22}$$

Zatem, by zapas nie był zerowy, musi być spełniony warunek:

$$\tau^k < \frac{\varphi^k_n}{v_{n,z}} \tag{23}$$

Sterowanie U^k dla operacji wymiany złożeń jest wektorem zerowym.

4.2. Operacja walcowania wsadu

Jeżeli stan X^{k-1} spełnia warunek:

$$\forall_{1 \le n \le N} \left[\min_{1 \le i \le I} \left(\sigma_{i,\lambda_{i,n}} - x^{k-1}_{i,\lambda_{i,n}} > 0 \right) \wedge \left(z^{k-1}_{n,m} > 0 \right) \right. \tag{24}$$

oraz

$$\forall_{1 \le i \le I} \quad y^k_i = 0 \tag{24a}$$

i realizowany jest n-ty produkt, to na podstawie U^k otrzymamy:

$$x^k_{i,j} = \begin{cases} x^{k-1}_{i,j} + u^k_2, \text{ dla } (u^k_1 = n) \wedge (j = \lambda_{i,n}) \\ x^{k-1}_{i,j}, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{24b}$$

oraz

$$z^k_{i,j} = \begin{cases} z^{k-1}_{\nu,j} + u^k_2, \text{ dla } (\nu = u^k_1 \\ z^{k-1}_{\nu,j}, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{24c}$$

Ponadto

$$t^k = t^{k-1} + \frac{u^k_2}{v_{n,1}} \tag{25}$$

Zapasy wsadu wyznaczamy ze wzoru:

$$s^k_m = s^{k-1}_m - u^k_{m+2} + d_m (t^k - t^{k-1}) \tag{26}$$

Zapasy produktów wyznaczamy ze wzoru:

$$\varphi^k_n = \begin{cases} \varphi^{k-1}_n + u^k_2 - v_{n,2}(t^k - t^{k-1}), & \text{dla } n = u^k_1 \\ \max\left[0, \varphi^{k-1}_n - v_{n,2}(t^k - t^{k-1}) \right], & \text{dla } n \ne u^k_1 \end{cases} \tag{27}$$

Zatem, aby nie nastąpiło przepełnienie n-tego magazynu buforowego, musi być spełniony warunek:

$$\theta^k \le \frac{b_n - \varphi^{k-1}_n}{v_{n,1} - v_{n,2}} \tag{28}$$

co wynika z (27) dla $n = u^k_1$.

5. Opis matematyczny

W równaniach stanu zakładano, że sterowanie w k-tej operacji jest żadane. Obecnie rozważymy dopuszczalne sterowanie Y^k oraz U^k.

Dla operacji wymiany walców wektor Y^k ma niezerowe współrzędne, a wektor U^k jest zerowy, natomiast dla operacji walcowania wsadu wektor U^k ma niezerowe współrzędne, a wektor Y^k jest zerowy. Ponieważ przestoje ELW mogą powodować przestoje dalszych agregatów, zatem przyjmiemy, że wymiany złożeń dokonuje się tylko w przypadkach koniecznych.

Jeżeli

$$\forall_{1 \le n \le N} \quad \min_{1 \le i \le I} \left(\sigma_{i,\lambda_{i,n}} - x^{k-1}_{i,\lambda_{i,n}} \right) = 0 \tag{29}$$

to w stanie X^{k-1} na ELW nie można realizować żadnego produktu i ELW zostaje zatrzymana w celu wymiany niektórych złożeń.

W przypadku, gdy wiele złożeń spełnia warunek (29), powstaje problem najlepszego wyboru w sensie przyjętego kryterium. Jeżeli warunek (29) nie jest spełniony, to należy wybrać:

- numer produktu ($u_1^k = n$) musi spełniać warunek:

$$\left[\min_{1\le i\le I} (\varepsilon^{k-1}_{i,\lambda_{i,n}} - x_{i,\lambda_{i,n}}) > 0\right] \wedge (\varphi_n^{k-1} < b_n) \wedge \left(\sum_{m=1}^{m=M} s_m^{k-1} \cdot r_{m,n} > 0\right) \quad (30)$$

- tonaż produktu (u_2^k) musi spełniać warunek:

$$0 < u_2^k \le \min \left\{ \min_{1\le i\le I} (\varepsilon_{i,\lambda_{i,n}} - x^{k-1}_{i,\lambda_{i,n}});\ (b_n - \varphi_n^{k-1}) \frac{w_{n,1}}{w_{n,1} - w_{n,2}};\ \sum_{m=1}^{m=M} s_m^{k-1} r_{m,n} \right\} \quad (31)$$

- typy i tonaże wsadów (u^k_{m+2}) muszą spełniać warunek:

$$\forall_{1 \le m \le M} \ (u^k_{m+2} > 0) \Longrightarrow (r_{m,n} = 1) \quad (32)$$

Tonaże wsadów muszą spełniać warunki:

$$\forall_{1 \le m \le M} \ u^k_{m+2} \le s_m^{k-1} \quad (32a)$$

oraz

$$\sum_m u^k_{m+2} = u_2^k \quad (32b)$$

Spośród sterowań dopuszczalnych należy wybrać najlepsze z punktu widzenia przyjętego kryterium optymalizacji.

Załóżmy, że w procesie walcowania należy minimalizować <u>przestoje</u> agregatów. Dla rejestracji tych przestojów wprowadzimy wektor:

$$V^k = [\ v_n^k\ ] \qquad n=1,\dots,N \quad (33)$$

gdzie: v_n^k - sumaryczna strata przestoju n-tego agregatu.

Elementy wektora (33) wyznaczamy następująco:

$$v_n^k = \begin{cases} v_n^{k-1} + h_n[(t^k - \max(\psi_n^k, t^{k-1})] & \text{, jeśli } t_n^k > \psi_n^k \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \quad (33a)$$

W obliczeniach należy zapamiętać wektor:

$$\psi^k = [\ \psi_n^k\ ] \qquad n=1,\dots,N \quad (34)$$

gdzie: ψ_n^k - chwila, w której po k-tej operacji zapas n-tego produktu spadnie do zera.

Wartości początkowe przyjmujemy następująco:

$$\psi_n^o = \frac{\varphi_n^o}{w_{n,2}} \qquad n=1,\dots N \quad (35)$$

Jeśli k-ta operacja była wymianą walców, to

$$\psi_n^k = \frac{\varphi_n^{k-1}}{w_{n,2}} \qquad n=1,\dots N \quad (35a)$$

W przypadku, gdy k-ta operacja polegała na walcowaniu n-tego produktu, to

$$\psi_n^k = \begin{cases} t^{k-1} + \dfrac{\varphi_n}{w_{n,2}}, & \text{dla } u_1^k = n \\ \psi_n^k, & \text{dla } u_1^k \ne n \end{cases} \quad (35b)$$

Aby nie naliczać wielokrotnie tych samych strat w (33a), przyjęto różnicę $t^k - t^{k-1}$, gdzie:

$$t^k = \max(\psi_n^k, t^{k-1}) \quad (36)$$

Jeżeli $\quad t^{k-1} > \psi_r^{k-1} \quad (37)$

to dla k-1-szej operacji według (33a) wyznacza się stratę dla przedziału czasu od ψ_n^{k-1} do t^{k-1}. Zatem, jeśli dla k-tej operacji mamy:

$$t^k > \psi_n^k = \psi_n^{k-1} \tag{38}$$

to stratę należy naliczyć tylko dla przedziału czasu od t^{k-1} do t^k. Uzasadnia to wzór (37).

6. Algorytmy heurystyczne

Z punktu widzenia przyjętego kryterium można przyjąć następujące reguły heurystyczne:

- Wybór produktu

Aby nie nastąpił przestój agregatu, zaleca się realizować produkt n, którego najwcześniej może zabraknąć w magazynie buforowym.

Zatem wyznaczamy:

$$\psi_n^k = \min_{1 \le \nu \le N} (\psi_\nu^{k-1}) \tag{39}$$

- Wybór ilości produktu

Ilość wybranego produktu u_z^k musi spełniać warunek (31).

Ponadto przyjmuje się, że:

$$u_z^k < w_{n,1}(\psi_n^k - \psi_l^k) \tag{40}$$

jeśli ψ_l^k jest kolejnym terminem (l≠n), wyznaczonym według (39).

- Wybór wsadu

Dla realizacji n-tego produktu zaleca się wybór m-tego wsadu, którego zapas jest największy, tzn.:

$$s_m^k = \max_{1 \le \mu \le M} s_\mu^k r_{\mu,n} \tag{41}$$

- Wybór walców do wymiany

Aby ograniczyć przestój ELW zaleca się wymianę złożeń o największych czasach τ_i.

Załóżmy, że dany jest zbiór β^k walców przeznaczonych do wymiany:

$$\exists_j \ (x_{i,j}^k = \varepsilon_{i,j}) \Longrightarrow (i \in \beta^k) \tag{42}$$

Ze zbioru tego wyznaczamy i-ty walec, jeśli spełnia warunek:

$$\tau_i = \max_{l \in \beta^k} \tau_l \tag{43}$$

Jeśli po wymianie i-tego walca na ELW można realizować pewne produkty, to sprawdzamy warunek:

$$\forall_{1 \le n \le N} \ t^{k+1} < \psi_n^{k+1} \tag{44}$$

Jeżeli po wymianie pierwszego walca na ELW nie można realizować żadnego produktu, trzeba wymienić kolejne walce aż do udrożnienia pewnej marszruty technologicznej.

6.1. Algorytmy "czarnej skrzynki"

W praktyce produkcyjnej ELW może być traktowana jak "czarna skrzynka". Oznacza to, że nieznany jest stan ELW. Mimo to podejmuje się decyzje o realizacji zamówień. Efektywność tych algorytmów można oszacować symulując proces walcowania.

- Algorytm maksymalnego zamówienia

W algorytmie tym w stanie X^{k-1} wybiera się n-te zamówienie, jeśli spełnia ono warunek:

$$\max_{1 \le \nu \le N} z_\nu^{k-1} = z_n^k \tag{45}$$

Ponadto u_z^k wynika z (3).

- Algorytm minimalnej wydajności

W algorytmie tym w stanie X^{k-1} wybiera się n-te zamówienie, jeśli spełnia ono warunek;

$$\min_{\nu \in \gamma^{k-1}} w_\nu = w_n \tag{46}$$

przy tym

$$\gamma^{k-1} = \{ \nu: \ z_\nu^{k-1} > 0 \} \tag{47}$$

Ponadto u_z^k wynika z (3).

- Algorytm maksymalnego czasu

Algorytm ten uogólnia dwa poprzednie algorytmy. Wybierane jest n-te zamówienie, które spełnia warunek:

$$\max_{1 \le \nu \le N} \frac{z_\nu^{k-1}}{w_\nu} = \frac{z_n^{k-1}}{w_n} \tag{48}$$

Statystycznym uzasadnieniem dla przedstawionych algorytmów "czarnej skrzynki" (kryterium maksymalizacji) jest stosowanie heurystyk dla kryterium minimalizacji.

6.2 Algorytmy przepustowości marszrut

W algorytmie tym wybiera się w stanie X^{k-1} n-ty produkt spełniający warunek:

$$\max_{\alpha \in \gamma^{k-1}} p_\nu^{k-1} = p_n^{k-1} \tag{49}$$

przy czym:

$$p_\nu^{k-1} = \min_{1 \le i \le I} (\sigma_{i,j} - x_\nu^{k-1}) \tag{50}$$

Ponieważ algorytm ten nie daje gwarancji uzyskania minimalnego czasu walcowania t_c^k dlatego stosuje się algorytm minimalnej przepustowości.

- Algorytm minimalnej przepustowości

W algorytmie tym wyznaczamy:

1) produkt n, który ma być realizowany

$$p_n^{k-1} = \min_{1 \le m \le N} p_m^{k-1} \tag{51}$$

2) ilość realizowanego produktu

$$u_n^k = \min (p_n^{k-1}, z_n^{k-1}) \tag{52}$$

3) zmodyfikowany stan po pierwszym kroku (ogólnie po k-tym kroku, k=1,...,K).

$$x_{i,j}^k = \begin{cases} x_{i,j}^{k-1} + u_n^k, & \text{jeśli } j = \lambda_{i,n} \\ x_{i,j}^{k-1}, & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{53}$$

4) zmodyfikowane przepustowości wykrojów

$$p_{i,j}^k = \varepsilon_{i,j} - x_{i,j}^k \qquad i=1,\dots,I \quad j=1,\dots,J \tag{54}$$

5) zmodyfikowane przepustowości marszrut

$$p_m^k = \min_{1 \le i \le I} p_{i,\lambda_{i,m}}^k \tag{55}$$

Jeżeli

$$\exists_m \; p_m^k > 0 \tag{56}$$

to powtarzamy obliczenia od 1) do 5).

- Algorytm maksymalnej przepustowości

W algorytmie maksymalnej przepustowości przyjmuje się:

$$p_n^k = \max_{1 \le m \le N} p_m^{k-1} \tag{57}$$

Heurystyka maksymalnej przepustowości zakłada, że w fazie pomiędzy dwoma kolejnymi "zatkaniami" ELW należy zrealizować jak najwięcej zamówień

7. Heurystyczne algorytmy wymiany walców

Algorytmy wymiany walców ELW dotyczą przypadku zatrzymania procesu walcowania, gdy każda marszruta zostanie zatkana. Przyjmiemy, że walce i-tego złożenia mogą być wymienione, jeśli conajmniej jeden wykrój jest całkowicie zużyty, tzn.

$$\beta = \{ i: \exists_n \; x_{i,j} = \varepsilon_{i,j} \} \tag{58}$$

gdzie: β - zbiór numerów złożeń, które mogą być wymienione.

7.1. Algorytm czasów wymiany walców

Oznaczmy przez X^K stan zatkanej linii a przez X^O stan linii po wymianie walców. Załóżmy, że

$$|\beta| > 1 \tag{59}$$

W algorytmie czasów wymiany walców porządkujemy narastająco walce, które należą do zbioru β według czasów τ_i. Następnie wykonywane są dwa kroki obliczeniowe w pętli:

- wymianić walec o aktualnie najmniejszym czasie τ_i,
- sprawdzić, czy dostępna jest conajmniej jedna marszruta.

W pierwszym kroku wyznaczamy:

$$x^c_{i,j} = \begin{cases} e_{i,j}, & \text{jeśli i-te złożenie jest wymieniane,} \\ x_{i,j}, & \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases} \tag{60}$$

W drugim kroku sprawdzamy warunek:

$$\exists_{n} \min_{1 \le i \le N} x^c_{i,j} < \epsilon_{i,\lambda_{i,n}} \tag{60a}$$

Jeżeli warunek (60a) nie jest spełniony, to powtarzamy (60) i (60a) dla kolejnego złożenia ze zbioru β. Czas przestoju linii jest suma czasów wymienianych walców.

Drugi skrajny wariant tego algorytmu przyjmuje, że po wymianie walców wszystkie marszruty muszą być dostępne. Zatem warunek (60a) przyjmie postać:

$$\forall_{1 \le n \le N} \min_{1 \le i \le N} x^c_{i,j} < \epsilon_{i,\lambda_{i,n}} \tag{60b}$$

7.2. Algorytm przepustowości walców

W algorytmie tym walce ze zboru β są porządkowane rosnąco według przepustowości. Przepustowość i-tego walca jest określona następująco:

$$p_i = \sum_{n=1}^{n=J_i} (\epsilon_{i,j} - x_{i,j}) \tag{61}$$

Następnie wykonywane są dwa kroki obliczeniowe w pętli:

- wymienić walec o aktualnie najmniejszej przepustowości p_i,
- sprawdzić, czy dostępna jest conajmniej jedna (lub w drugim wariancie wszystkie) marszruta.

Dalej wykorzystywane są formuły (60) i (60a).

7.3. Algorytm przepustowości marszrut

W algorytmie tym marszruty są porządkowane malejąco według zamówień z_n. Następnie ze zbioru β wyznaczamy i-ty walec (lub walce), który spełnia warunek:

$$x_{i,\lambda_{i,n}} = \epsilon_{i,\lambda_{i,n}} \tag{62}$$

Dalej wyznaczamy stan X^o. Warunek (60a) jest więc spełniony. W drugim wariancie dla spełnienia warunku (60b) powtarzamy obliczenia dla kolejnych zamówień z_n.

Algorytm ten preferuje wymianę walców, które dają możliwości realizacji największych zamówień.

7.4. Algorytm przepustowości wykrojów

W algorytmie tym dla złożeń należących do zbioru β wyznaczany jest wykrój stanowiący "wąskie gardło". Zatem określamy zapotrzebowanie $\Pi_{i,j}$ na wykrój:

$$\Pi_{i,j} = \sum_{n \in o_{i,j}} z_n \tag{63}$$

przy czym

$$\alpha_{i,j} = \{ n: (\lambda_{i,n} = j) \wedge (i \in \beta) \} \quad (64)$$

Następnie wyznaczamy

$$\Pi_{r,s} = \max_{i,j} \Pi_{i,j} \quad (65)$$

Tak określone złożenie r jest wymienione, by spełniony był warunek (60a). Jeśli warunek ten nie jest spełniony, to powtarzamy obliczenia, wyznaczając kolejne złożenia do wymiany. Kontynuując obliczenia można dojść do spełnienia warunku (60b).

8. Zakończenie

Dla problemu sterowania operatywnego przedstawiono model symulacyjny i algorytmy sterowania procesem walcowania pozwalające na nieprzerwaną pracę agregatów (walcowni finalnych) poprzez utrzymanie każdego produktu w magazynie wyjściowym. Parametry wykrojów i parametry ELW z nimi związane są wielkościami mierzalnymi wyrażonymi w milimetrach. Z otrzymanego harmonogramu dla różnych heurystyk algorytmu sterowania operatywnego procesem walcowania otrzymuje się numery zużytych złożeń i chwile ich wymiany.

Sterowanie operatywne ELW polega na podejmowaniu decyzji:

- o wyborze produktu i wsadu,
- ładunku produktu i wsadu do procesu walcowania,
- o wyborze złożeń przeznaczonych do wymiany.

Decyzje te są podejmowane na podstawie reguł heurystycznych, uwzględniających stan procesu. Z uwagi na zakłócenia dostaw wsadu oraz poboru produktów sterowanie optymalne nie jest możliwe.

LITERATURA

[1] Rasztabiga D.: Optymalizacja procesu walcowania. ZN Pol. Śl., Automatyka z 110, Gliwice 1992.

[2] Rasztabiga D., Marecki F.: Modelling of Rolling-Mill Line. ZN Pol. Śl., Mechanika z 108, Gliwice 1992. Int. Conf. Computer Integrated Manufacturing "CIM'92", Zakopane 1992.

[3] Rasztabiga D., Marecki F.: Równania stanu procesu walcowania. ZN Pol. Śl., Automatyka, Gliwice 1992 (w druku).

[4] Rasztabiga D., Marecki F.: Modele matematyczne i algorytmy sterowania procesem walcowania ciągłego, Raport z pracy n-b RP.I.02., Gliwice 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. K. Wala

Wpłynęło do redakcji do 30.04.1992.

Abstract: The Flexible Rolling Line (FRL) makes it possible to manufacture a various range of goods. A proper tool is needed for each assortment and particular line unit. The production of different range of goods is related to the necessity of tool replacement. It is assumed that

the tools are multifunctional, i.e. they can be used for manufacturing various assortments. The tool replacement causes FRL shut-downs, which decreases its effectiveness.

Generally, two problems of FRL control can be distinguished: schedule generation and competent control.

With the problem of FRL competent control the FRL is assumed to be fed with random lots of charge at random moments of time. Buffer stores are placed at the entry and exit of the FRL. These stores are of unlimited capacity. In the buffer store, the charge reserves are restocked by a charge mass flow at a constant time. The FRL products are conveyed by portions to the further units. These units should be operated continuously. Buffer stores for proper products are provided before them to ensure that the units are operated continuously. The product of one type can be located in each buffer store. The absence of product causes specified production losses. Coincident production of various assortment on the FRL causes the tool replacement and the FRL down-time.

The purpose of FRL control is the minimization of losses resulting from the lack of products in buffer stores and the down-time of further units.

In the case of FRL, decision variables for rolling process and roll replacement are distinguished which determine the sequences and product range for certain charge and the choice of unit in which roll replacement is required.