

Mgr inż. Mirosław Zaborowski
Katedra Automatyki
Procesów Przemysłowych

1.5. WPŁYW KOLEJNOŚCI DOZOWANIA SKŁADNIKÓW NA DOBROĆ REGULACJI STOSUNKU MIESZANIN WIELOSKŁADNIKOWYCH

Streszczenie: Szeroko rozpowszechnionym sposobem zestawiania mieszanek materiałów sypkich jest dozowanie składników w określonym stosunku na transporter zbiorczy z zasobników umieszczonych szeregowo nad transporterem. Podobną strukturę ma układ służący do sporządzania mieszanki cieczy doprowadzanych przewodami do rurociągu zbiorczego.

Cechą charakterystyczną obu w/w układów jest występowanie opóźnień transportowych między poszczególnymi punktami dozowania, co pogarsza dobroć regulacji stosunku.

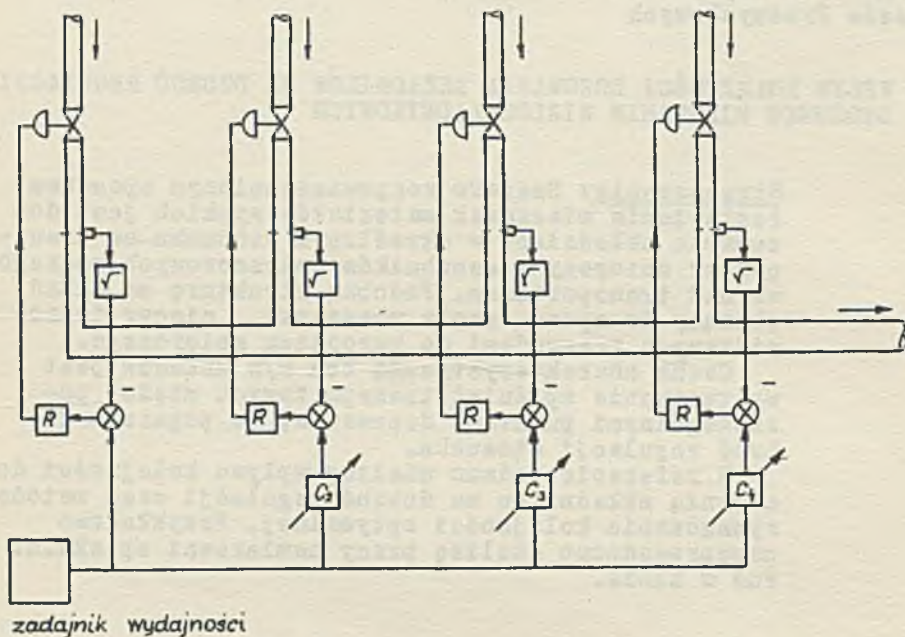
W referacie podano analizę wpływu kolejności dozowania składników na dobroć regulacji oraz metodę wyznaczania kolejności optymalnej. Przykładowo przeprowadzono analizę pracy namiarowni spiekalni rud w huście.

I. Równania stacji mieszankowej

W wielu procesach przemysłowych zachodzi potrzeba sporządzania mieszanek. Szeroko rozpowszechnionym sposobem zestawiania mieszanek materiałów sypkich jest dozowanie składników w określonym stosunku na transporter taśmowy z zasobników umieszczonych szeregowo nad transporterem. Podobną strukturę ma układ służący do sporządzania mieszanki cieczy doprowadzanych przewodami do rurociągu zbiorczego (rys. 1). Zespół urządzeń służących do sporządzania mieszanki, wraz z układem regulacji stosunku, będzie dalej nazywany stacją mieszankową.

Zadaniem układu regulacji stosunku jest takie sterowanie natężeniami dopływu surowców, aby mieszanka ze stacją mieszankową miała wymagany skład. Głównymi zakłóceniami są zmiany natężenia dopływu surowców i zmiany ich składu chemicznego. Jeżeli

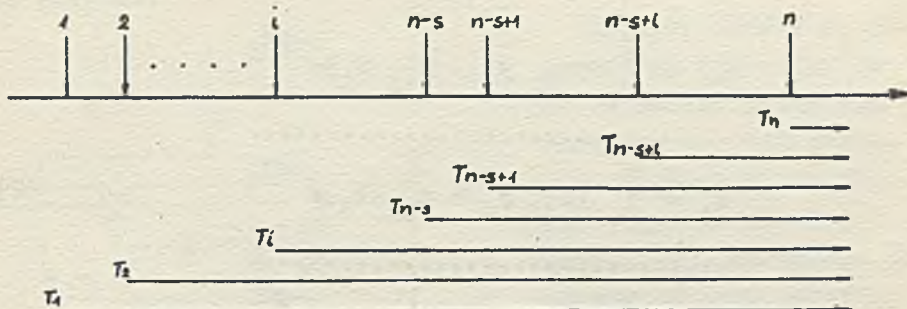
surowce, z których sporządzana jest mieszanka, zawierają tylko jeden składnik, względnie są mieszaninami wieloskładnikowymi



Rys. 1. Stacja mieszankowa cieczy

o stałym składzie, to można zastosować prosty układ regulacji stosunku jak na rys. 1. Wartości stosunków o_2 , o_3 , o_4 mogą być zmieniane przez obsługę. W praktyce zdarza się często, że surowce, z których ma być sporządzana mieszanka, są mieszaninami wieloskładnikowymi o silnie zmiennym składzie. Wówczas układ regulacji stosunku nie może działać poprawnie bez analizatora składu chemicznego. Podstawowym problemem jest szybkość działania analizatora. Struktura układu regulacji stosunku jest w dużej mierze zależna od szybkości analizatorów, które są do dyspozycji.

Dynamikę przepływu materiałów w stacji mieszankowej ilustruje rys. 2. Zgodnie z tym schematem mieszaniu podlega n surowców. Opóźnienie transportowe między i -tym punktem dozowania, a punktem odniesienia wynosi T_1 ($i = 1, 2, \dots, n$).



Rys. 2. Schemat strukturalny stacji mieszankowej

Ze schematu na rys. 2 wynika układ równań (1).

$$\begin{aligned}
 z_1 &= \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i e^{-pT_1} \\
 &\dots\dots\dots \\
 z_j &= \sum_{i=1}^n x_{ji} y_i e^{-pT_1} \\
 &\dots\dots\dots \\
 z_m &= \sum_{i=1}^n x_{mi} y_i e^{-pT_1}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Oznaczenia:

- z_j ($j = 1, 2, \dots, m$) - natężenie przepływu j -tego składnika mieszanki wyjściowej,
- y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) - natężenie przepływu i -tego surowca,
- x_{ji} - udział j -tego składnika w i -tym surowcu.

W dalszym ciągu pracy przyjmuje się, że wszystkie wielkości występujące w równaniach są wielkościami operatorowymi, ale dla skrócenia zapisu opuszcza się symbol p . Ponadto wartości średnie zmiennych oznaczają się dużymi literami, a przyrosty małymi, opuszczając znak Δ .

Układ równań (1) ma po linearyzacji postać następującą:

$$\begin{aligned}
 z_1 &= \sum_{i=1}^n (x_{1i} y_i + x_{1i} Y_i) e^{-pT_1} \\
 &\dots\dots\dots \\
 z_j &= \sum_{i=1}^n (x_{ji} y_i + x_{ji} Y_i) e^{-pT_1} \\
 &\dots\dots\dots \\
 z_m &= \sum_{i=1}^n (x_{mi} y_i + x_{mi} Y_i) e^{-pT_1}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Wymagania odnośnie składu chemicznego mieszanki można zawsze przedstawić układem równań (3), gdzie K_{lj} - stałe.

$$\begin{aligned}
 K_{11} z_1 + \dots + K_{1j} z_j + \dots + K_{1m} z_m &= e_1 \\
 &\dots\dots\dots \\
 K_{l1} z_1 + \dots + K_{lj} z_j + \dots + K_{lm} z_m &= e_l \\
 &\dots\dots\dots \\
 K_{s1} z_1 + \dots + K_{sj} z_j + \dots + K_{sm} z_m &= e_s
 \end{aligned} \tag{3}$$

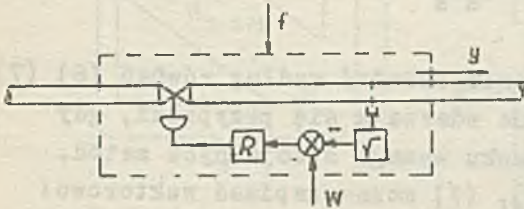
e_l ($l = 1, 2, \dots, s$) - błąd regulacji. Zadaniem układu regulacji stosunku jest utrzymywanie $e_l = 0$.

Szerególnym przypadkiem układu równań (3) jest układ równań (4), według którego działa stacja mieszankowa materiałów jedno składnikowych z rys. 1.

$$o_2 z_1 - z_2 = e_2, \quad o_3 z_1 - z_3 = e_3, \quad \dots \quad o_m z_1 - z_m = e_m \tag{4}$$

Współczynniki K_{lj} nie tylko narzucają warunki na wzajemne stosunki z_j , lecz także wagi, z którymi wchodzi do regulatorów sygnały błędów e_l . Jest tak, ponieważ każde z równań (3) może być w przypadku $e_l = 0$ mmożone przez dowolną stałą. W stanie nierównowagi e_l są różne (przy tych samych odchyleniach z_j) zależnie od przyjętych K_{lj} . Należy też zwrócić uwagę na znaki

K_{1j} , które powinny być takie, aby po zamknięciu pętli regulacyjnych, w układzie wystąpiło ujemne, a nie dodatnie sprzężenie zwrotne.



Rys. 3. Układ regulacji przepływu

Sygnaly błędów e_1 poprzez UAR oddziałują na natężenia przepływu surowców y_1 . UAR pracuje w typowym dla regulacji stosunku układzie kaskadowym. Na każdym dopływie surowca zainstalowany jest układ regulacji przepływu. Wartości

zadane części tych układów są nastawione na stałe, natomiast wartości zadanych UAR nadrzędny nastawia w funkcji zmian sygnałów błędu e_1 . UAR przepływu (rys. 3) można traktować jak układ o jednym wyjściu - natężenie przepływu y , i dwu wejściach - wartość zadana w i zakłócenia przepływu f .

$$y = Gw + Hf \tag{5}$$

G, H - funkcje przejścia.

Równania typu (5) dla wszystkich dopływów składają się na następujący układ równań (6). Układ równań (7) opisuje blok regulatorów.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= H_1 f_1 \\
 &\dots\dots\dots \\
 y_{n-s} &= H_{n-s} f_{n-s} \\
 y_{n-s+1} &= H_{n-s+1} f_{n-s+1} + G_{n-s+1} w_1 \\
 &\dots\dots\dots \\
 y_{n-s+1} &= H_{n-s+1} f_{n-s+1} + G_{n-s+1} w_1 \\
 &\dots\dots\dots \\
 y_n &= H_n f_n + G_n w_s
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 w_1 &= R_1 e_1 \\
 &\dots\dots\dots \\
 w_1 &= R_1 e_1 \\
 &\dots\dots\dots \\
 w_s &= R_s e_s
 \end{aligned} \tag{7}$$

Układ regulacji może poprawnie działać według równań (6) (7) pod warunkiem $n > s$. W praktyce zdarzają się przypadki, gdy $n \leq s$. Wówczas regulacja stosunku wymaga specjalnych metod.

Układy równań (2), (3), (6), (7) można zapisać wektorowo:

$$\begin{aligned}
 \underline{z} &= \underline{X} \underline{E}_1 \underline{y} + \underline{x} \underline{E}_1 \underline{Y} \\
 \underline{e} &= \underline{K} \underline{z} \\
 \underline{w} &= \underline{R} \underline{e} \\
 \underline{y} &= \underline{H} \underline{f} + \underline{G} \underline{w}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 \underline{z} &= \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_j \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} & \underline{y} &= \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_j \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} & \underline{Y} &= \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} & \underline{e} &= \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_1 \\ \vdots \\ e_s \end{bmatrix} & \underline{f} &= \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} & \underline{w} &= \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_1 \\ \vdots \\ w_s \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \underline{X} &= \begin{bmatrix} X_{11} \dots X_{11} \dots X_{1n} \\ \dots \dots \dots \\ X_{j1} \dots X_{j1} \dots X_{jn} \\ \dots \dots \dots \\ X_{m1} \dots X_{m1} \dots X_{mn} \end{bmatrix} & \underline{X} &= \begin{bmatrix} X_{11} \dots X_{11} \dots X_{1n} \\ \dots \dots \dots \\ X_{j1} \dots X_{j1} \dots X_{jn} \\ \dots \dots \dots \\ X_{m1} \dots X_{m1} \dots X_{mn} \end{bmatrix} & \underline{H} &= \begin{bmatrix} H_1 & \begin{array}{c} \diagdown \\ \vdots \\ \diagdown \end{array} & \begin{array}{c} \diagup \\ \vdots \\ \diagup \end{array} & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & \begin{array}{c} \diagup \\ \vdots \\ \diagup \end{array} & H_1 & \dots \dots \dots \\ & & & \begin{array}{c} \diagdown \\ \vdots \\ \diagdown \end{array} \\ & & & H_n \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

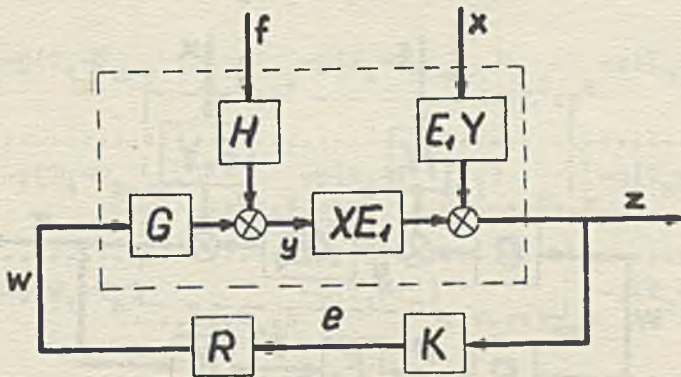
$$\underline{G} = \left[\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} 0 \\ \dots \\ G_{n-s+1} \\ \dots \\ G_{n-s+l} \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ G_n \end{array} \right] \\ s \end{array} \right] \quad \left. \vphantom{\underline{G}} \right\} n$$

$$\underline{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & \dots & K_{1j} & \dots & K_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{l1} & \dots & K_{lj} & \dots & K_{lm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{s1} & \dots & K_{sj} & \dots & K_{sm} \end{bmatrix}$$

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} R_1 & & & & & & 0 \\ & \dots & & & & & \\ & & \dots & & & & \\ & & & \dots & & & \\ & & & & \dots & & \\ & & & & & \dots & \\ & & & & & & \dots \\ & & & & & & & \dots \\ & & & & & & & \dots \\ 0 & & & & & & & & R_s \end{bmatrix}$$

$$\underline{E}_1 = \begin{bmatrix} e^{-pT_1} & & & & & 0 \\ & \dots & & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & \dots & & \\ & & & & \dots & \\ & & & & & \dots \\ & & & & & & \dots \\ & & & & & & & \dots \\ 0 & & & & & & & & e^{pT_n} \end{bmatrix}$$

Równaniom (8) odpowiada schemat blokowy z rys. 4. Jest to schemat układu regulacji z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Węzeł sumacyjny jest zawarty w bloku K.



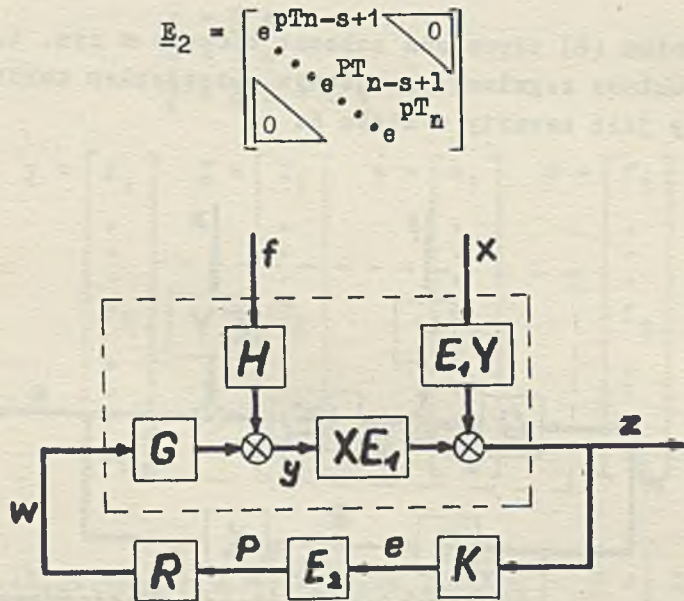
Rys. 4. Schemat blokowy stacji mieszankowej

II. Wpływ kolejności dozowania na dobroć regulacji stosunku w układzie zamkniętym

Cechą charakterystyczną stacji mieszankowej (rys. 2) jest występowanie opóźnień transportowych między poszczególnymi punktami dozowania. W związku z tym na dobroć regulacji stosunku ma wpływ kolejność dozowania. Wpływ ten jest różny, zależnie

od struktury układu regulacji. Zostanie on najpierw przedyskutowany dla układu zamkniętego (rys. 4). Ponieważ w takim układzie dynamika pomiaru składu chemicznego ma istotny wpływ na dynamikę całego układu, realizacja schematu z rys. 4 jest celowa tylko wówczas, gdy analizatory składu chemicznego mają małe opóźnienia pomiarowe.

Przy tym założeniu opóźnienia transportowe występujące w układzie są reprezentowane macierzą \underline{E}_1 . Macierz funkcji przejścia układu otwartego (rys. 4) jest równa iloczynowi $\underline{K}\underline{X}\underline{E}_1\underline{G}\underline{R}$. Opóźnienia transportowe można usunąć z tej funkcji przejścia przez włączenie w pętlę sprzężenia zwrotnego (na razie czysto formalnie) bloku predykcji błędu o macierzy funkcji przejścia \underline{E}_2 (rys. 5).



Rys. 5. Schemat blokowy stacji mieszankowej bez opóźnień transportowych w układzie regulacji stosunku

Dla schematu z rys. 5 macierz funkcji przejścia układu otwartego jest następująca:

$$\underline{K}\underline{X}\underline{E}_1\underline{G}\underline{R}\underline{E}_2 = \underline{K}\underline{X}\underline{G}\underline{R} \quad (9)$$

Z (9) wynika, że w funkcji przejścia układu otwartego nie ma już opóźnień transportowych. Należy teraz zbadać realizowalność takiego układu. Macierz \underline{E}_2 ma nierealizowalne elementy predykcji typu e^{pT} . Mimo to układ może być realizowalny, jeżeli sygnał predykcji błędu $\underline{p} = \underline{E}_2 \underline{e}$ jest dostępny pomiarowo. Jest to możliwe pod warunkiem, że składniki mające wpływ na l -ty bilans układu równań (3) nie występują w strumieniach surowców o indeksach $i > n - s + 1$.

Uzasadnienie tego twierdzenia jest następujące:

$$\underline{p} = \underline{E}_2 \underline{K} [\underline{X} \underline{E}_1 \underline{Y} + \underline{x} \underline{E}_1 \underline{Y}] = \underline{E}_2 \underline{U} \underline{E}_1 \underline{Y} + \underline{E}_2 \underline{u} \underline{E}_1 \underline{Y} \quad (10)$$

gdzie: $\underline{U} = \underline{K} \underline{K}$; $\underline{u} = \underline{K} \underline{x}$; $U_{11} = \sum_{j=1}^m K_{1j} X_{j1}$; $u_{11} = \sum_{j=1}^m K_{1j} x_{j1}$

Warunek realizowalności sygnału \underline{p} jest równoważny realizowalności elementów macierzy $\underline{E}_2 \underline{U} \underline{E}_1$, $\underline{E}_2 \underline{u} \underline{E}_1$.

$$\underline{E}_2 \underline{U} \underline{E}_1 = \begin{bmatrix} U_{11} e^{-p(T_1 - T_{n-s+1})} & \dots & U_{11} e^{-p(T_1 - T_{n-s-1})} & \dots & U_{1n} e^{-p(T_n - T_{n-s+1})} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{11} e^{-p(T_1 - T_{n-s+1})} & \dots & U_{11} e^{-p(T_1 - T_{n-s+1})} & \dots & U_{1n} e^{-p(T_n - T_{n-s+1})} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{s1} e^{-p(T_1 - T_n)} & \dots & U_{s1} e^{-p(T_1 - T_n)} & \dots & U_{sn} e^{-p(T_n - T_n)} \end{bmatrix}$$

Aby elementy tej macierzy były realizowalne, potrzeba by różnice stałych T_i w nawiasach były nieujemne. Te U_{11} (oraz u_{11}), dla których to nie zachodzi, powinny być równe 0. Jeżeli $U_{11} = 0$ dla $i > n - s + 1$, to wszystkie elementy macierzy $\underline{E}_2 \underline{U} \underline{E}_1$ są realizowalne.

Zerowanie się U_{11} dla $i > n - s + 1$ oznacza, że przy zmianie natężenia przepływu y_1 , błąd l -tego bilansu układu równań (3), tym spowodowany, jest równy 0. Podobnie $u_{11} Y_1$ jest to błąd l -tego bilansu spowodowany zmianami składu chemicznego w i -tym surowcu.

Wybierając kolejność dozowania, tzn. przeznaczenie zasobników materiałów sypkich nad transportem zbiorczym lub w przypadku cieczy - przewodów doprowadzających do rurociągu zbiorczego, projektant ma do dyspozycji macierze \underline{K} , \underline{X} , \underline{x} i może obliczyć \underline{U} , oraz \underline{u} . Przedstawiając kolumny macierzy \underline{U} i \underline{u} przedstawia się odpowiednio kolumny macierzy \underline{X} i \underline{x} , co fizykalnie odpowiada zmianie kolejności dozowania. Przeszycie wierszy macierzy \underline{K} odpowiada zmianom strumienia surowca, przy pomocy którego UAR oddziałuje na równowagę danego bilansu układu równań (3). Dlatego zmiana kolejności kolumn macierzy \underline{X} i \underline{x} powinna być zawsze związana z odpowiednią zmianą kolejności wierszy macierzy \underline{K} (por. przykład z rozdz. III).

Strumienie surowców przeznaczone do regulacji poszczególnych bilansów (3) powinny być ostatnie w kolejności. Kolejność poprzedzających je strumieni jest nieistotna. Do sprawdzenia pozostaje więc si permutacji kolejności punktów dozowania strumieni regulowanych. Jeżeli żadna z tych permutacji nie daje macierzy \underline{U} "idealnej" ($U_{1i} = 0$ dla $i > n - s + 1$), to powstaje problem wyboru takiej kolejności dozowania, przy której straty spowodowane małą dobrocią regulacji są minimalne. Wektora predykcji błędu \underline{p} nie można wówczas zrealizować. Przeważnie można jednak zrealizować wektor \underline{q} , którego współrzędne wyprzedzają odpowiednie sygnały błędów e_1 , ale wyprzedzenie to jest zbyt małe, aby całkiem usunąć z pętli regulacyjnej opóźnienia transportowe.

$$\underline{q} = \underline{E}_3 \underline{e}$$

$$\underline{E}_3 = \begin{bmatrix} e^{pT'_1} & & & & & \\ & \cdot & & & & \\ & & \cdot & & & \\ & & & \cdot & & \\ & & & & e^{pT'_1} & \\ & & & & & \cdot \\ & & & & & & e^{pT'_s} \\ & & & & & & & \cdot \\ & & & & & & & & e^{pT'_s} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} 0 \leq T'_1 \leq T_{n-s+1} \\ 0 \leq T'_1 \leq T_{n-s+1} \\ 0 \leq T'_s \leq T_n \end{aligned} \quad (11)$$

Kryterium, które należy minimalizować przy wyborze kolejności dozowania, zależy od struktury układu regulacji. Dobre wyniki może dać układ regulacji kaskadowej z pętlą szybką obej-

mującą część stacji mieszankowej bez opóźnień transportowych. O stratach regulacji w takim układzie decydują te zakłócenia, dla których $i > n - s + 1$. Stąd wynika kryterium:

$$A = \sum_{i=1}^{s-1} (T_{n-s+1} - T'_i) \sum_{i=n-s+1+1}^n (U_{1i} H_i f_i + u_{1i} Y_i) \quad (12)$$

III. Wpływ kolejności dozowania na dobroć regulacji stosunku w innych układach

Większość analizatorów składu chemicznego charakteryzuje się dużym opóźnieniem pomiarowym. Z tego powodu zamiast regulacji stosunku w układzie zamkniętym stosuje się inne rozwiązania. Przykładem może być układ regulacji zasadowości i ilości paliwa w mieszance spiekalniczej, przedstawiony na rys. 6.

Mieszanka spiekalnicza zestawiana jest z 4 surowców; rudy (krzyworoskiej), syderytu, kamienia wapiennego i koksika, których średnio natężenia przepływu w kg na metr bieżący taśmy wynoszą kolejno: $Y_1 = 30$, $Y_2 = 5$, $Y_3 = 3,5$, $Y_4 = 2,8$. Czasy przejścia mieszanki między kolejnymi zasobnikami wynoszą 4,8 s. Skład surowców w % podaje następująca tabela:

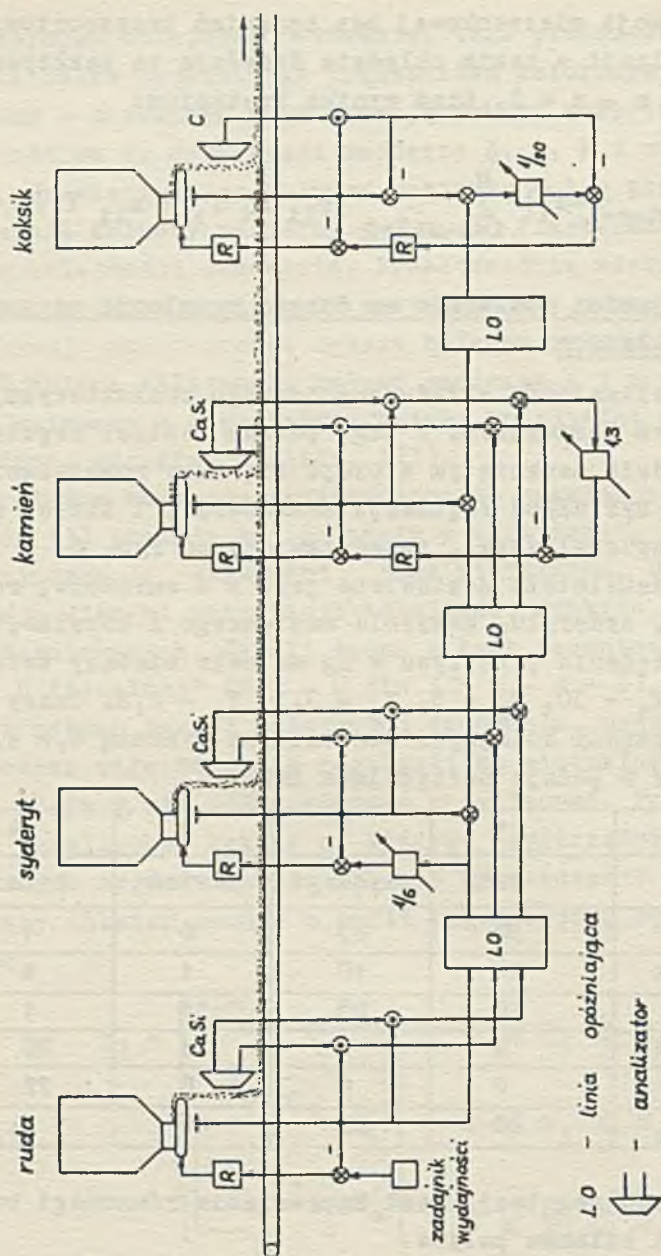
	1	1	2	3	4
j		ruda	syderyt	kamień	koksik
1	żelazo	50	25	0	1
2	krzemionka	14	10	1	4
3	wapno	10	25	58	1
4	woda	6	5	1	20
5	węgiel	0	0	0	70
6	inne	20	35	40	4

Zadaniem układu regulacji jest zapewnienie równowagi bilansu zasadowości i bilansu paliwa:

$$1,3 z_2 - z_3 = e_1$$

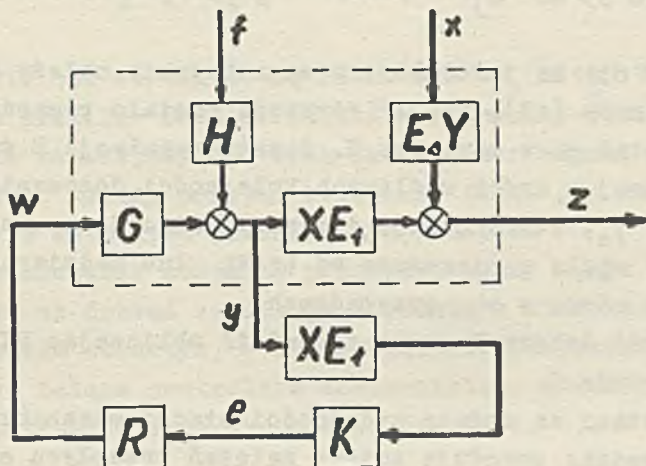
(13)

$$0,05(z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_6) - z_5 = e_2$$



Rys. 6. Przykładowe rozwiązanie stacji mieszankowej spiekalni rud

Charakterystycznym dla układu z rys. 6 jest obliczanie błędów regulacji na modelu, do którego z opóźnieniem pomiarowym analizatorów wprowadzane są informacje o aktualnym średnim składzie surowców. Układ regulacji nie reaguje na zmiany składu chemicznego o dużej częstotliwości. Jest to wyraźnie widoczne na schemacie blokowym tego układu (rys. 7).



Rys. 7. Schemat blokowy układu z rys. 6

Ponieważ UAR z modelem pracuje w układzie zamkniętym, ważne są dla niego wszystkie wnioski z poprzedniego rozdziału. Np. możliwa tu jest do osiągnięcia regulacja bez czasów martwych, pod warunkiem, że zaniedba się SiO₂ i CaO w koksiku. Taki właśnie układ jest przedstawiony na rys. 6. Jeżeli nie zrobi się tego uproszczenia, to podobnie jak w układzie zamkniętym, powstaje problem wyboru kolejności zasobników koksika i kamienia. Należy tylko zmodyfikować kryterium (12) usuwając z niego wyraz odpowiadający szybkim zmianom składu chemicznego. Odpowiednie kryterium jest następujące:

$$B = \sum_{l=1}^{s-1} (T_{n-s+1}^{-T'_1}) \sum_{i=n-s+1+1}^n U_{11} H_1 f_1 \quad (14)$$

Dla rozpatrywanego przykładu jest:

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} 30 \\ 5 \\ 3,5 \\ 2,8 \end{bmatrix} \quad \underline{X} = \begin{bmatrix} 50 & 25 & 0 & 1 \\ 14 & 10 & 1 & 4 \\ 10 & 25 & 58 & 1 \\ 6 & 5 & 1 & 20 \\ 0 & 0 & 0 & 70 \\ 20 & 35 & 40 & 6 \end{bmatrix} \quad \underline{K} = \begin{bmatrix} 0 & 1,3 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,05\gamma & 0,05\gamma & 0,05\gamma & 0,05\gamma & -1\gamma & 0,05\gamma \end{bmatrix}$$

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} 8,2 & -12 & -56,7 & 4,2 \\ 5\gamma & 5\gamma & 5\gamma & -48,5\gamma \end{bmatrix}$$

Ponieważ nie ma informacji o wagach jakie należy przypisać błędom bilansów (13), drugie równanie zostało pomnożone przez stałą γ . Stąd γ w macierzy U . Straty regulacji B związane z wyborem jednej z dwóch możliwych kolejności dozowania są równe dla pewnej γ_0 , która podaje ile razy ważniejszy musi być brak, lub nadmiar węgla w mieszance od braku lub nadmiaru wapna, aby straty były równe w obu przypadkach.

Poprawność doboru \underline{Y} można sprawdzić obliczając \underline{UY} , które powinno być równe \underline{Q} .

Zakłóceniami są zmiany wydajności stacji mieszkankowej. Ponieważ te zmiany powodują zmiany natężeń przepływu surowców proporcjonalne do wartości średnich, przy obliczaniu B można przyjąć \underline{Y} zamiast \underline{Hf} .

$$B = \sum_{l=1}^{2-1} (T_{4-2+1} - T'_1) \sum_{i=4-2+1+1}^4 U_{1i} Y_i = (T'_3 - T_4) U_{14} Y_4 =$$

$$= 4,8 \cdot 4,2 \cdot 2,8 \cong 4,8 \cdot 12$$

Dla wariantu alternatywnego ostatnim zasobnikiem jest zasobnik kamienia, a przedostatnim zasobnik koksika. Wówczas jest:

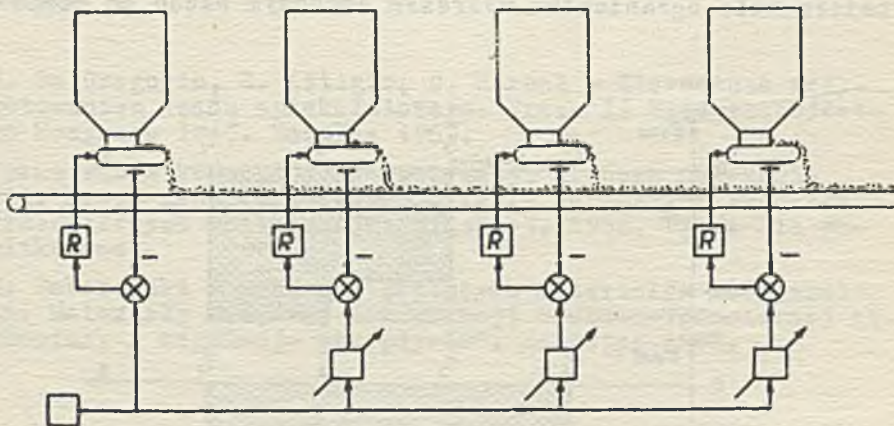
$$\underline{X} = \begin{bmatrix} 50 & 25 & 1 & 0 \\ 14 & 10 & 4 & 1 \\ 10 & 25 & 1 & 58 \\ 6 & 5 & 20 & 1 \\ 0 & 0 & 70 & 0 \\ 20 & 35 & 4 & 40 \end{bmatrix} \quad \underline{Y} = \begin{bmatrix} 30 \\ 5 \\ 2,8 \\ 3,5 \end{bmatrix} \quad \underline{K} = \begin{bmatrix} 0,05\gamma & 0,05\gamma & 0,05\gamma & 0,05\gamma & -1 & 0,05\gamma \\ 0 & 1,3 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} 5\gamma & 5\gamma & -68,5\gamma & 5\gamma \\ 8,2 & -12 & 4,2 & -56,7 \end{bmatrix}$$

$$B = (T_3 - T_4)U_{14}Y_4 = 4,8 \cdot 5\gamma \cdot 3,5 = 4,8 \cdot 17,5\gamma$$

Straty dla obu wariantów są równe dla $\gamma_0 = 12/17,5 = 0,7$. Ponieważ brak lub nadmiar paliwa w mieszance jest dla procesu spiekania ważniejszy niż brak lub nadmiar wapna, a $\gamma_0 = 0,7$, to na pewno należy przyjąć kolejność taką, jak na rys. 6, tzn. zasobnik z koksikiem powinien być ostatni.

Na zakończenie zostanie przedyskutowany wpływ kolejności dozowania na dobroć regulacji stosunku w niedokładnym, lecz takim układzie otwartym, w którym zmiana wydajności stacji mieszankowej zadana centralnym nastawnikiem, powoduje jednoczesną zmianę przepływu wszystkich surowców (rys. 8). W układzie tym



zadajnik wydajności

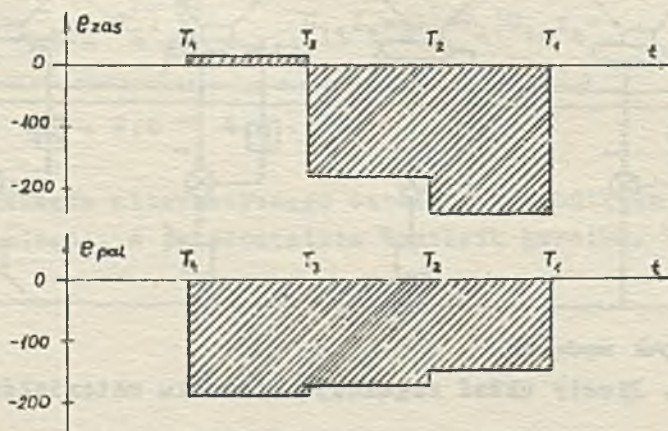
Rys. 8. Prosty układ regulacji stosunku materiałów sypkich

po skokowym wzroście wydajności stacji, w mieszance wyjściowej brak jest początkowo tych składników, które znajdują się w pierwszych zasobnikach. Wektor błędu tym spowodowanego jest proporcjonalny do $\underline{UE}_1 \underline{Y}$. Dla stacji mieszankowej spiekalni rud, przy założeniu tych samych danych, co w przykładzie poprzednim, błąd dynamiczny przy zmianach wydajności stacji jest proporcjonalny do:

$$\underline{UE}_1 \underline{Y} = \begin{bmatrix} 8,2 & -12 & -56,7 & 4,2 \\ 5 & 5 & 5 & -68,5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 30 e^{-pT_1} \\ 5 e^{-pT_2} \\ 3,5 e^{-pT_3} \\ 2,8 e^{-pT_4} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 246 e^{-pT_1} - 60 e^{-pT_2} - 198 e^{-pT_3} + 12 e^{-pT_4} \\ 150 e^{-pT_1} + 25 e^{-pT_2} + 17,5 e^{-pT_3} - 192,5 e^{-pT_4} \end{bmatrix}$$

Oblizzone wyżej przebiegi obu błędów są przedstawione na rys. 9. Powierzchnie ograniczone wykresem czasowym błędów są różne w za-



Rys. 9. Przebieg błędów w układzie bez linii opóźniających

leżności od kolejności dozowania. Kryterium, które należy minimalizować przy wyborze kolejności optymalnej, jest sumą powierzochni błędu wziętych z odpowiednimi wagami. Analitycznie można je przedstawić następująco:

$$C = \sum_{l=1}^s \sum_{k=2}^n (T_{l-1} - T_l) \left| \sum_{k=1}^n U_{lk} Y_k \right| \quad (15)$$

W odróżnieniu od układów rozpatrywanych poprzednio, przy wyborze kolejności należy zbadać nie permutacji kolejności wszystkich zasobników, a nie tylko tych, w których natężenia przepływu surowców były regulowane w poprzednich rozwiązaniach.

Jak wynika z powyższych przykładów, w większości rozwiązań układów regulacji stosunku mieszanin wieloskładnikowych, kolejność dozowania wpływa istotnie na dobroć regulacji. Kryteria wyboru kolejności optymalnej zmieniają się w zależności od struktury układu.

LITERATURA

- [1] G. De Gregorio, C. Litigio, G. Sironi - Sterowanie przygotowaniem wsadu spiekalniczego. Prace II Międzynarodowego Kongresu IFAC. Bazylea 1963.
- [2] Opracowanie koncepcji automatyzacji procesu spiekania rud. Praca naukowo-badawcza Katedry Automatyki Procesów Przemysłowych Politechniki Śląskiej. 1963. Praca nie publikowana.
- [3] M. Zaborowski - Dynamika przepływu materiałów w spiekalni. Materiały Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej pt. "Pomiary i regulacja przepływów". Katowice 1968.