

Stanisław CIERPISZ

MODELOWANIE I SYMULACJA PROCESU MIESZANIA WĘGLI

Streszczenie. W pracy przeanalizowano możliwości jednoczesnej stabilizacji dwóch parametrów jakościowych mieszanki węgla. Analizę przeprowadzono z zastosowaniem modeli symulacyjnych systemów, umożliwiających ocenę efektów stabilizacji i optymalizacji ich parametrów.

1. WSTĘP

Jakość mieszanki węgla energetycznego jako paliwa określana jest zwykle przez zawartość popiołu, wilgoci i siarki. Pierwsze dwa parametry pozwalają w przybliżeniu wyznaczyć jej wartość opałową, natomiast zawartość siarki w wielu przypadkach jest parametrem narzuconym przez wymagania ochrony środowiska.

Stale zwiększające się wymagania odbiorców mieszanek węgla, jeśli chodzi o stałość ich jakości, doprowadziły jak dotąd do konstrukcji i przemysłowych zastosowań układów automatycznej stabilizacji jednego parametru jakości, np. popiołu lub wilgoci [1,3]. Idealnym przypadkiem byłoby jednoczesne utrzymywanie wartości opałowej i zawartości siarki w mieszance na zadanych wartościach. Spełnienie tak postawionego zadania wymaga jednak wprowadzenia znacznie bardziej zaawansowanych układów automatycznej regulacji.

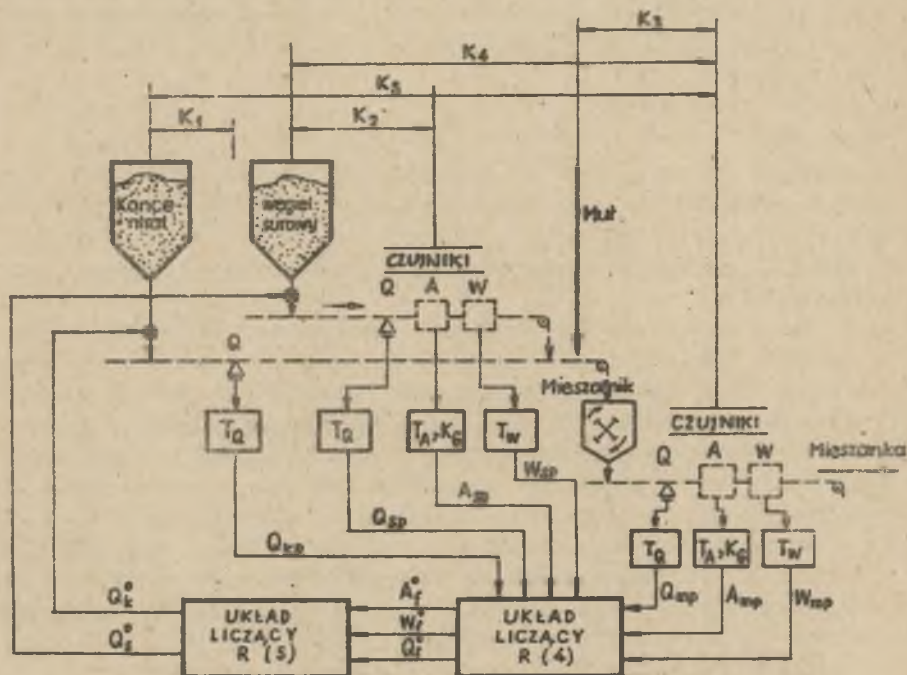
Wydaje się, że pozytywne rezultaty uzyskane w ostatnich latach w konstrukcji automatycznych układów pomiaru zawartości popiołu i siarki w węglu [1,2] pozwalają obecnie bardziej optymistycznie oceniać możliwości przemysłowych zastosowań układów stabilizacji jakości mieszanek węgla.

Dotychczasowe doświadczenia w projektowaniu, a następnie optymalizacji układów kontroli procesów mieszania w trakcie ich przemysłowej eksploatacji wykazują, że jakiegokolwiek zmiany w lokalizacji układów pomiarowych lub zmiany w strukturze układów są bardzo pracochłonne i kosztowne. Z tego względu bardzo pomocne w projektowaniu optymalnych układów sterowania są wszelkiego rodzaju metody hadania układów modelowych. Charakter procesu technologicznego, wyróżniającego się zwykle istnieniem szeregu opóźnień czasowych /transport materiałów taśmociągami, zbiorniki/, sprawia, że jedną z najwygodniejszych metod analizy w tym przypadku jest symulacja procesu z zastosowaniem maszyny cyfrowej.

W niniejszej pracy przeanalizowano możliwości jednoczesnej stabilizacji dwóch parametrów jakościowych mieszanki. Analizę przeprowadzono z zastosowaniem modeli symulacyjnych systemów, umożliwiających ocenę efektów stabilizacji i optymalizację ich parametrów. Jako przykład wybrano trójskładni-

kowy proces mieszania węgla surowego, węgla wzbogaconego i mułu oraz zadanie stabilizacji zawartości popiołu i wilgoci w mieszance. Podobnie można analizować inne systemy, w których stabilizowane są np. zawartość popiołu i siarki.

Na rys. 1 i 2 przedstawiono dwie propozycje układów sterowania o odmiennych strukturach, spełniających to samo zadanie stabilizacji. W obu układach dwa składniki (węgiel surowy i wzbogacony) są magazynowane w zbiornikach, natomiast natężenie przepływu mułu zmienia się z biegiem czasu, w zależności od wydajności sekcji filtracji. Opóźnienia czasowe (transportowe)



Rys. 1. Układ sterowania procesem produkcji mieszanki węgla energetycznego - alternatywa I.

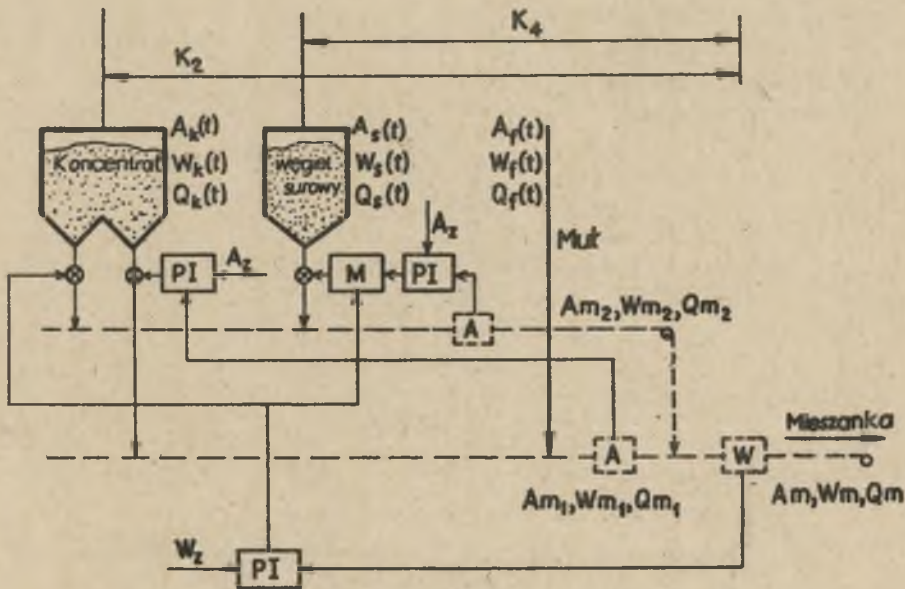
występujące w procesie technologicznym oznaczono przez K_1 , natomiast stałe czasowe układów pomiarowych przez T_1 :

Układy regulacji w obu przypadkach dostosowują wydajności magazynowanych składników do zmian ich parametrów jakościowych tak, aby zawartość popiołu i wilgoci w mieszance były stale równe wartościom zadanych. Parametry jakościowe składników w dalszym ciągu traktowane są jako zakłócenia oddziałujące na układ sterowania.

W pierwszym układzie (rys. 1), który można nazwać "układem kompensacji zakłóceń" zakłada się, że węgiel wzbogacony ma stałą jakość (A_k, W_k) nato-

miast popiołu i wilgoć w węglu surowym (A_s, W_s) i mieszance (A_m, W_m) są mierzalne. Na podstawie pomiaru tych wielkości wylicza się najpierw parametry jakościowe mułu (A_f, W_f) a następnie wymagane natężenia przepływu węgla surowego i wzbogaconego (Q_s, Q_k).

W drugim systemie (rys. 2), który można nazwać "układem ze sprzężeniem zwrotnym", mierzy się jedynie zawartość popiołu w mieszance i wilgoci, wykorzystując wprost odchylenia od wartości zadanych do sterowania wydajnościami dozowników składników. W pierwszej kolejności stabilizuje się zawartość popiołu w dwóch pośrednich strumieniach mieszanki (A_{m1} i A_{m2}), następnie dobiera się wydajności tych strumieni w stosunku zapewniającym otrzymanie zadanej zawartości wilgoci.



Rys. 2. Układ sterowania procesem produkcji mieszanki węgla energetycznego - alternatywa II.

2. SYMULACJA PROCESU TECHNOLOGICZNEGO I ELEMENTÓW UKŁADU STEROWANIA

Modelowanie symulacyjne działania powyższych układów umożliwia odwołanie przebiegów czasowych wszystkich parametrów składników i mieszanki oraz pozwala ocenić efekt stabilizacji w zależności od wyboru podstawowych parametrów określających własności systemu (czasy opóźnień k_1 , stałe czasowe układów pomiarowych T , parametry regulatorów PI).

Do symulacji systemów przedstawionych na rys. 1 i 2 opracowano program, którego strukturę przedstawiono na rys. 4.

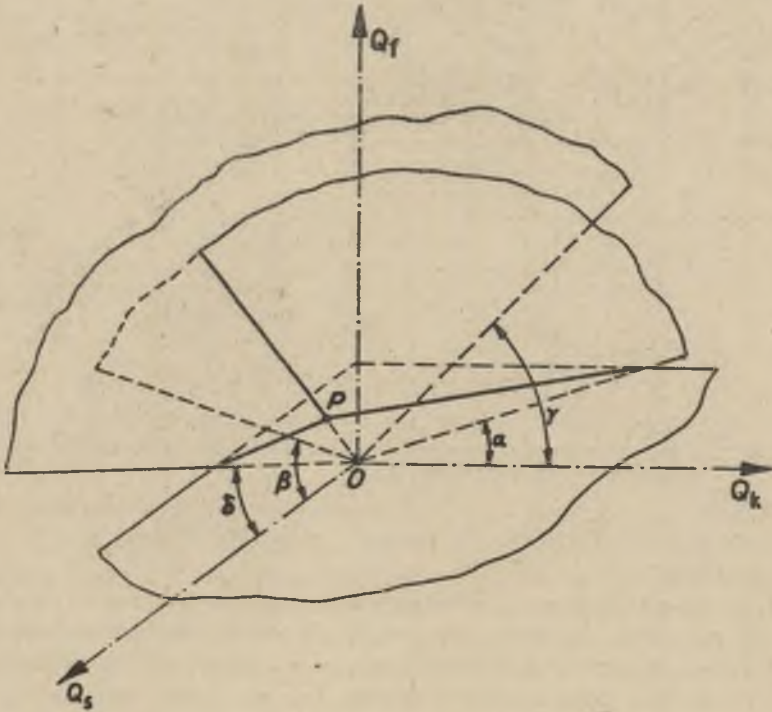
2.1. Proces mieszania (rys. 1 - program główny)

Przyjęto następujące oznaczenia:

- A - zawartość popiołu, %
- W - zawartość wilgoci, %
- Q - natężenie przepływu, t/h

Indeksy:

- k - węgiel wzbogacony,
- s - węgiel surowy,
- f - muł,
- m - mieszanka,
- z - zawartość zadana,
- o - wartość obliczona,
- p - wielkość mierzona,
- k_i - czas opóźnienia.



Rys. 3. Charakterystyka statyczna procesu mieszania

Proces mieszania przedstawiony na rys. 1 opisany jest następującymi równaniami:

$$\begin{aligned}
 A_m Q_m &= A_k Q_k + A_s Q_s + A_f Q_f \\
 W_m Q_m &= W_k Q_k + W_s Q_s + W_f Q_f \quad \dots\dots 1 \\
 Q_m &= Q_k + Q_s + Q_f
 \end{aligned}$$

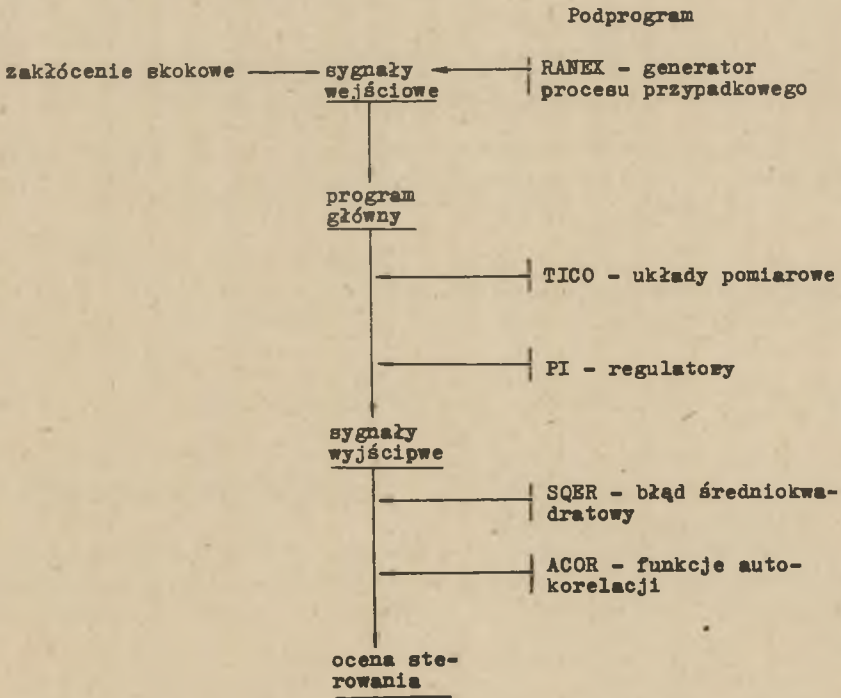
Dodatkowym warunkiem stabilizacji jakości mieszanki są równości

$$A_m = A_z \quad i \quad W_m = W_z$$

gdzie A_z i W_z - wartości zadane popiołu i wilgoci w mieszance.

Rozwiązanie graficzne układu równań (1) przedstawiono na rys. 3, na którym p. P wyznacza natężenie przepływu Q_k i Q_s dla danych parametrów składników A_i , W_i i Q_f . Nachylenia płaszczyzn na rys. 4 określone są następująco (dla dodatkowego warunku $A_s > A_z$ i $W_s > W_z$):

Struktura Programu



Rys. 4. Struktura programu symulacyjnego.

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{A_k - A_s}{A_z - A_f}; & \operatorname{tg} \beta &= \frac{A_s - A_z}{A_z - A_f} \quad \dots (2) \\ \operatorname{tg} \delta &= \frac{W_k - W_z}{W_z - W_f}; & \operatorname{tg} \delta' &= \frac{W_s - W_z}{W_z - W_f} \end{aligned}$$

W dalszym ciągu założono, że zależność pomiędzy sygnałem wyjściowym i wejściowym dla wszystkich elementów pomiarowych może być opisana przez równanie różniczkowe pierwszego rzędu (podprogram TICO):

$$\frac{dY}{dt} = \frac{1}{T_i} (X - Y), \quad \dots (3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} Y &- \text{ sygnał wyjściowy } (A_{mp}, A_{sp}, W_{sp} \dots), \\ X &- \text{ sygnał wejściowy } (A_m, A_s, W_s \dots), \\ T_i &- \text{ stała czasowa elementu pomiarowego,} \end{aligned}$$

Niemierzalne parametry mułu mogą być wyznaczone następująco z równań (1) (3):

$$\begin{aligned} Q_f^0 &= Q_{mp} - Q_{kp} - Q_{sp} \\ A_f^0 &= (A_{mp} Q_{mp} - A_k Q_{kp} - A_{sp} Q_{sp}) Q_f^0 \\ W_f^0 &= (W_{mp} Q_{mp} - W_k Q_{kp} - W_{sp} Q_{sp}) Q_f^0 \end{aligned} \quad \dots (4)$$

Żądane natężenia przepływu węgla wzbogaconego i surowego mogą być wyznaczone z równań (1) i (4) przy zachowaniu dodatkowego warunku stabilizacji $A_m = A_z$ i $W_m = W_z$:

$$Q_k^0 = Q_f^0 \frac{(W_f^0 - W_z)(A_z - A_{sp}) + (W_z - W_{sp})(A_z - A_f^0)}{(W_z - W_k)(A_z - A_{sp}) + (W_z - W_{sp})(A_k - A_z)} \quad \dots (5)$$

$$Q_s^0 = Q_f^0 \frac{(W_z - W_{sp})(A_z - A_k) + (W_z - W_k)(A_f^0 - A_z)}{(W_z - W_k)(A_z - A_{sp}) + (W_z - W_{sp})(A_k - A_z)}$$

2.2. Generator procesu przypadkowego o wykładniczej funkcji autokorelacji (podprogram RANEX)

W oparciu o wyniki pracy [4] symulowano zakłócenia występujące w systemie jako stacjonarne procesy przypadkowe o wykładniczych funkcjach autokorelacji $R(\tau) = \sigma \exp[-\alpha(\tau)]$. Zastosowano w tym celu następujący algorytm:

$$\begin{aligned} Z(n) &= a_0 x(n) + b_1 Z(n-1) \\ a_0 &= \sigma \{1 - \exp(-2\alpha \Delta t)\}^{1/2} \\ b_1 &= \exp(-\alpha \Delta t), \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

- $\{n\}$ - wartości przebiegu przypadkowego w chwilach
 $n = 0, 1, 2, \dots$
- σ - odchylenie standardowe procesu,
- α - współczynnik autokorelacji,
- Δt - przyrost czasu odpowiadający $\Delta n = 1$,
- $x(n)$ - ciąg wartości -1 $+1$ o rozkładzie równomiernym.

2.3. Funkcja autokorelacji podprogram ACOR

Ocena własności statystycznych przebiegów stochastycznych dokonywana była na podstawie ich funkcji autokorelacji. Do wyznaczenia funkcji autokorelacji $R_x(\tau)$ przebiegu stochastycznego $x(t)$ zastosowano następujące wyrażenie:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_0^T x(t)x(t+\tau) d\tau \quad \dots \quad (7)$$

2.4. Średni błąd kwadratowy podprogram SQER

Badano reakcje systemów sterowania (rys. 1 i 2) na zakłócenia skokowe i przypadkowe. W obu przypadkach dla oceny odchylenia przebiegu $x(t)$ od wartości zadanej x_z stosowano średni błąd kwadratowy określony przez wyrażenie:

$$SE(\bar{x})^2 = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} \{x(t) - x_z\}^2 dt, \quad \dots \quad (8)$$

gdzie:

t_0 - czas uśredniania przebiegu $x(t)$.

2.5. Regulatory PI (podprogram PI)

W układach regulacji (rys. 2) zastosowano regulatory proporcjonalno - całkujące opisane dla sygnału wyjściowego $y(t)$ i wejściowego $x(t)$ równaniem:

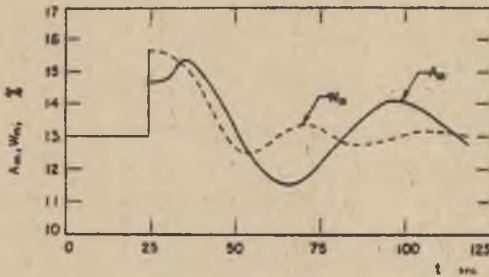
$$y(t) = G \left\{ x(t) + \frac{1}{T_j} \int_0^{T_j} x(t) dt \right\} \quad \dots \quad (9)$$

G - wzmacnienie regulatora

T_j - stała całkowania.

3. WYNIKI I WNIOSKI

Na rys. 5 - 8 przedstawiono przykładowe przebiegi zawartości popiołu i wilgoci w mieszance (A_m, W_m) oraz natężenia przepływu węgla wzbogaconego i surowego (Q_k, Q_s) jako reakcje układu regulacji (rys. 1) na skokową zmianę parametrów składników (A_s, W_s, A_f, W_f, Q_f). Wartości zakłóceń skokowych podano w tablicy 1.



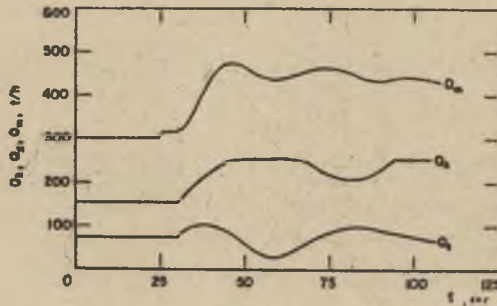
Rys. 5. Przebiegi czasowe parametrów stabilizowanych A_m i W_m dla krótkich stałych czasowych układu $TQ \approx TAM = TWM = 10$ sek. układ z rys. 1

Na rys. 9 przedstawiono powyższe przebiegi dla procesu mieszania z układem stabilizacji oraz bez układu stabilizacji dla przypadkowych zmian parametrów składników.

Do badania wpływu parametrów systemów na jakość stabilizacji popiołu i wilgoci w mieszance przyjęto kryterium średniego błędu kwadratowego (p.2.4) w odniesieniu do wartości zadanych.

Wartości średnich błędów kwadratowych popiołu i wilgoci w mieszance, w zależności od parametrów systemów, zestawiono w tablicach 1 i 2. Powyższe zestawienia umożliwiają wybór optymalnych parametrów systemów minimalizujących błędy stabilizacji.

Analiza wartości błędów stabilizacji zestawionych częściowo w tablicach 1 i 2 oraz przebiegów zawartości popiołu i wilgoci, jako reakcji systemów na zakłócenia, pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:



Rys. 6. Przebiegi czasowe natężenia przepływu składników dla danych z rys. 5.

Tabela 1

SREDNIE BŁĘDY KWADRATOWE ZAWARTOŚCI POPIOŁU I WILGOCI W MIESZANCE
(SEAM, SEWM) W UKŁADZIE REGULACJI (rys. 1)

TQK TQS TQM	TAM	TWM	SEAM	SEWM	U w a g i
sek	sek	sek	1	1	
5	5	5	0,104	0,048	opóźnienia czasowe
20	5	5	0,039	0,026	$k_1 = 0$
50	5	5	0,032	0,028	$k_2 = 0$
120	5	5	0,034	0,034	$k_3 = 14$ sek
5	30	5	0,034	0,052	$k_5 = 20$ sek
20	30	5	0,038	0,026	$k_6 = 14$ sek
50	30	5	0,029	0,028	Zakłócenia skokowe
120	30	5	0,031	0,035	$A_k = 7,0$ %
5	60	5	0,109	0,041	$W_k = 8,0$ %
20	60	5	0,039	0,026	$A_s = 20 \rightarrow 21$ %
50	60	5	0,031	0,029	$W_s = 8 \rightarrow 9$ %
120	60	5	0,033	0,035	$A_f = 18 \rightarrow 21$ %
5	5	30	0,090	0,039	$W_f = 27 \rightarrow 30$ %
20	5	30	0,030	0,031	$Q_f = 80 \rightarrow 90$ t/h
50	5	30	0,029	0,032	Wartości zadane
120	5	30	0,032	0,036	$A_z = 13,0$ %
5	30	30	0,098	0,041	$W_z = 13,0$ %
20	30	30	0,035	0,030	Czas uśredniania
50	30	30	0,031	0,031	$t_0 = 200$ sek
120	30	30	0,032	0,036	
5	60	30	0,110	0,045	
20	60	30	0,040	0,030	
50	60	30	0,033	0,036	
120	60	30	0,033	0,036	

TQK, TQS, TQM - stałe czasowe wag taśmowych,
TAM - stała czasowa popiołomierza,
TWM - stała czasowa wilgociomierza.

Tabela 2

SREDNIE BŁĘDY KWADRATOWE ZAWARTOŚCI POPIOŁU I WILGOCI W MIESZANCE
(SEAM, SEWM) W UKŁADZIE REGULACJI rys. 2

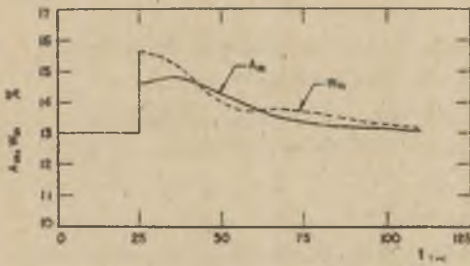
T_{jr}	G	GW	T_j	SEAM	SEWM	U w a g i
1	2	3	4	5	6	7
sek	1	1	sek	1	1	
20	20	1	60	0,025	0,038	
60	20	1	60	0,031	0,033	zakłócenia,
120	20	1	60	0,036	0,032	wartości zadane
20	100	2	60	0,481	0,320	i czas uśrednia-
60	100	2	60	0,038	0,073	nia jak w tabe-
120	100	2	60	0,036	0,042	li 1.
20	100	1	60	0,182	0,165	Opóźnienia
60	100	1	60	0,022	0,040	czasowe (rys. 2)
120	100	1	60	0,026	0,037	
20	20	1	120	0,022	0,039	$k_1 = 10$ sek
60	20	1	120	0,029	0,037	$k_2 = 14$ sek
120	20	1	120	0,037	0,036	TAM = 30 sek
20	100	2	120	0,182	0,165	TWM = 10 sek
60	100	2	120	0,022	0,040	
120	100	2	120	0,026	0,031	
20	100	1	120	0,174	0,152	
60	100	1	120	0,020	0,039	
120	100	1	120	0,023	0,039	
20	20	1	180	0,022	0,043	
60	20	1	180	0,029	0,042	
120	20	1	180	0,036	0,041	
20	100	2	180	0,177	0,157	
60	100	2	180	0,021	0,039	
120	100	2	180	0,024	0,038	
20	100	1	180	0,172	0,150	
60	100	1	180	0,020	0,042	
120	100	1	180	0,023	0,043	

G - wzmocnienie regulatora PJ (popiołu).

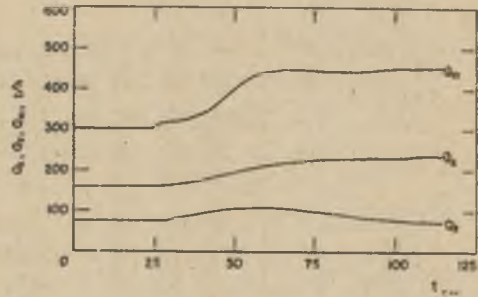
T_{jr} - stała całkowania regulatora PJ (popiołu).

GW - wzmocnienie regulatora PJ (wilgoci).

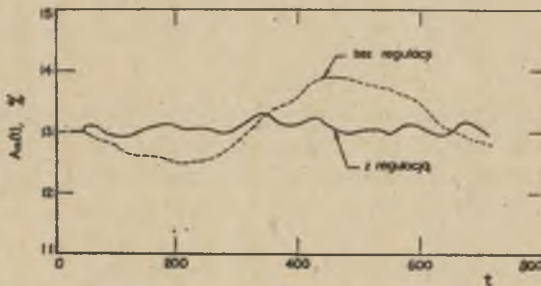
T_j - stała całkowania regulatora PJ (wilgoci).



Rys. 7. Przebiegi czasowe parametrów stabilizowanych A_m i W_m dla długich stałych czasowych $TQ = T_{AM} = T_{WM} = 30$ sek.



Rys. 8. Przebiegi czasowe natężenia przepływu składników dla danych z rys. 7.



Rys. 9. Przykładowe przebiegi czasowe parametrów w układzie sterowania z zakłóceniami stochastycznymi.

1. Jednoczesna stabilizacja zawartości popiołu i wilgoci w mieszance węgla jest możliwa w szerokim przedziale zmian jakości poszczególnych składników. W pewnych przypadkach pozwala to na stabilizowanie wartości opalowej mieszanki.
2. Metoda symulacji cyfrowej okazuje się szczególnie przydatna w analizie i optymalizacji rozpatrywanych procesów.
3. Zasadniczymi parametrami wpływającymi na jakość stabilizacji są opóźnienia transportowe i pomiarowe, występujące w rzeczywistych układach. Minimalizacja tych opóźnień umożliwia znaczne zmniejszenie błędów stabilizacji.
4. Podobne rezultaty można uzyskać dla procesów, w których zasadniczymi parametrami jakościowymi mieszanki są zawartość popiołu i siarki.

LITERATURA

- [1] Cammack P., Balint A.: On-stream ash in coal monitoring for profit. AIME Annual Meeting Las Vegas, Nevada, 22-26.02.1976
- [2] Hall A.W., Martin J.W., Stewart R.F.: Precision tests of neutron Sulfur meter in coal preparation plant. US Bureau of Mines, RI 8038, 1975.
- [3] Hampel M.: Automatic rapid determination of ash and moisture in West Germany and its uses as a preparation regulator. VI-th International Coal Preparation Congress. Paris 1973.
- [4] Cierpisz S.: Stabilizacja zawartości popiołu i wilgoci w procesach produkcji mieszanek węgla energetycznego. Prace GIG, Seria dodatkowa, Katowice, 1975.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИМУЛЯЦИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ УГЛЕЙ

Резюме

В статье рассматривается анализ возможности одновременной стабилизации двух качественных параметров угля. Анализ проведен с применением моделей моделирующих систем, дающих возможность оценки эффектов стабилизации и оптимизации этих параметров.

Modelling and Simulating the Coal Mixing Process

Summary

Possibilities have been analyzed of a simultaneous stabilization of two parameters related to the mixture quality. The analysis has been carried out with the utilization of system simulation models enabling evaluation and optimization of their parameters.