ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIE 2003
Seria: GÓRNICTWO z. 257 Nr kol. 1599

Stanisław CIERPISZ
Politechnika Śląska

ANALIZA UKŁADU REGULACJI JAKOŚCI MIESZANKI WĘGLA Z POPIOŁOMIERZEM RADIOMETRYCZNYM

Streszczenie. Przedstawiono analizę układów stabilizacji zawartości popiołu w procesie produkcji mieszanki węgla z zastosowaniem popiołomierzy radiometrycznych. Badano efekty stabilizacji w dwóch układach sterowania: w układzie z kompensacją zakłóceń oraz w układzie ze sprzężeniem zwrotnym. Uzyskiwane efekty stabilizacji zależą w znacznym stopniu od błędów pomiarowych popiołomierza. W praktycznych sytuacjach może okazać się, że lepsze efekty stabilizacji zawartości popiołu w mieszance węgla można uzyskać w układzie z kompensacją zakłóceń niż w układzie ze sprzężeniem zwrotnym.

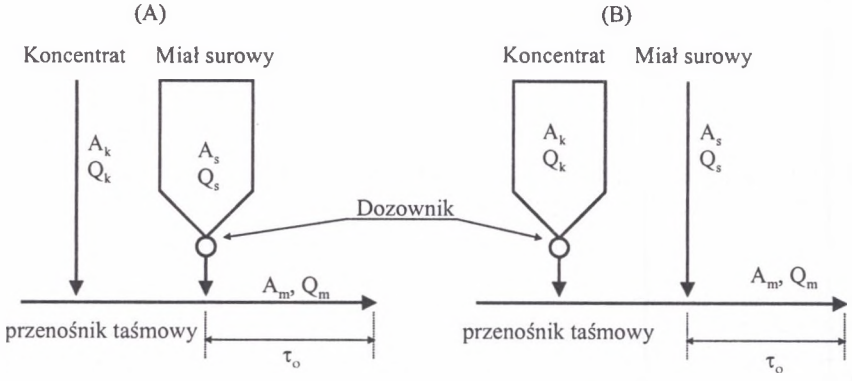
ANALYSIS OF A COAL BLEND QUALITY CONTROL SYSTEM WITH A RADIOMETRIC ASH MONITOR

Summary. Analysis of a coal blend quality control system with a radiometric ash monitor has been presented in this paper. Effects of stabilization have been analyzed in two control systems: in a system with compensation of disturbances (feed-forward control) and in a system with closed control loop (feedback control). Results of the control depend significantly on ash monitor accuracy. In practice it can appear that better control results can be achieved in the feed –forward system than in the closed loop control system.

1. Wstęp

Rozważmy proces produkcji mieszanki węgla z dwóch składników, np. z koncentratu z osadzarki oraz z miału surowego. Schemat układu technologicznego przedstawiony jest na rys.1. W układzie występują zakłócenia, sygnał sterujący oraz sygnały wyjściowe. W zależności od tego, który składnik jest magazynowany w zbiorniku, za sygnały zakłócające można przyjąć zawartości popiołu w miale surowym A_s i w koncentracie A_k oraz natężenie przepływu koncentratu Q_k lub miału surowego Q_s. Sygnałem sterującym w układzie z rys.1a

będzie natężenie przepływu miału surowego Q_s, które jest stałe lub kontrolowane przez układ sterowania. Sygnałami wyjściowymi są zawartość popiołu w mieszance A_m oraz jej natężenie przepływu Q_m.



Rys. 1. Układ technologiczny produkcji mieszanki z dwóch składników z jednym zbiornikiem
Fig. 1. A coal blending technological system with two components and one bunker

Założymy, że sygnały zakłócające będziemy traktować jako stochastyczne stacjonarne sygnały w postaci przebiegów przedstawionych w równaniu (1):

$$\begin{aligned} A_k(t) &= \overline{A}_k + \Delta A_k(t) \\ A_s(t) &= \overline{A}_s + \Delta A_s(t) \\ Q_k(t) &= \overline{Q}_k + \Delta Q_k(t) \\ Q_s(t) &= Q_s = const \quad (rys.1a) \quad \text{lub} \\ Qs(t) &= \overline{Q}s + \Delta Qs(t) \quad (rys.1b) \end{aligned} \tag{1}$$

W przykładach liczbowych załóżmy następujące wartości w równaniach (1):

$\overline{A}_k = 8[\%], \overline{A}_s = 30[\%], \overline{A}_m = 20[\%], \overline{Q}_k = 100[t/h], \sigma_k = 1[\%], \sigma_s = 3[\%], \sigma_{Qk} = 40[t/h],$
$\sigma_{Qs} = 10[t/h], \overline{Q}_s = 120[t/h].$

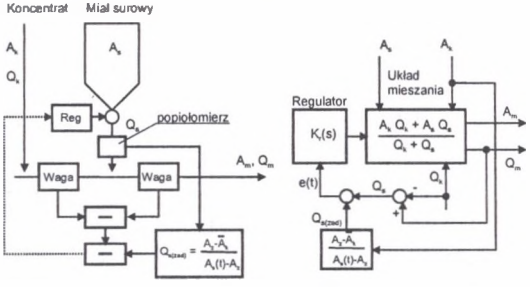
W układzie technologicznym obowiązują równania bilansu masowego oraz bilansu zawartości popiołu w trzech składnikach procesu mieszania:

$$\begin{aligned} Qm(t) &= Qk(t) + Qs(t) \\ Am(t) \cdot Qm(t) &= Ak(t) \cdot Qk(t) + As(t) \cdot Qs(t) \end{aligned} \tag{2}$$

2. Układ sterowania z kompensacją zakłóceń

Jeżeli celem sterowania w rozpatrywanym układzie produkcji mieszanki jest stabilizacja zawartości popiołu w mieszance A_m, to zakłóceniami oddziałującymi na obiekt będą

natężenia przepływu składników (Q_k lub Q_s), zawartość popiołu w koncentracie oraz zawartość popiołu w miale surowym. Załóżmy, że mierzalnymi zakłóceniami w rozpatrywanym układzie są wszystkie zakłócenia, z wyjątkiem zawartości popiołu w koncentracie (A_k), która zmienia się zresztą stosunkowo nieznacznie w porównaniu ze zmianami, np. zawartości popiołu w miale surowym (A_s). Schemat blokowy układu sterowania z kompensacją zakłóceń przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Układ kompensacji zakłóceń z dwoma pomiarami natężenia przepływu składników i popiołomierzem miału surowego

Fig. 2. Control system with compensation of disturbances with two measurements of components flows and ash monitor for raw fines

W układzie tym wymagane natężenie przepływu miału surowego wyliczane jest na podstawie wartości sygnałów z wag przenośnikowych (Q_k, Q_m) i popiołomierza radiometrycznego zainstalowanego na przenośniku miału surowego (A_s) według wzoru:

$$Qs(zad) = \frac{Az - Ak}{As(t) - Ak} Qk(t) \tag{3}$$

Można wykazać [3], że dla układu sterowania z idealną kompensacją $Q_k(t)$ odchylenie standardowe zmian zawartości popiołu σ_m w mieszance wyniesie:

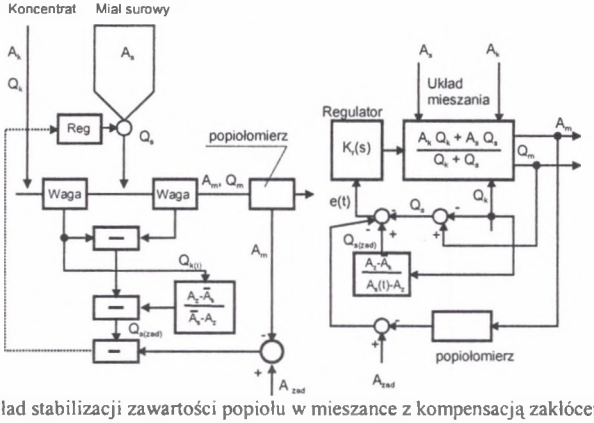
$$\sigma m = \sqrt{\left(\frac{Qk}{Qk + Qs}\right)^2 \sigma_k^2 + \left(\frac{Qs}{Qk + Qs}\right)^2 \sigma_p^2} \tag{4}$$

gdzie: σ_p – odchylenie standardowe błędu pomiarowego popiołomierza.

3. Układ sterowania ze sprzężeniem zwrotnym

Na rysunku 3 przedstawiono kolejną możliwość realizacji układu sterowania. W tym przypadku zastosowano bezpośredni pomiar zawartości popiołu w mieszance, który wykorzystano do kaskadowej korekty działania układu kompensacji zakłócenia w postaci zmian natężenia przepływu koncentratu. Możliwe są oczywiście inne wersje układu z

kompensacją kolejnych zakłóceń i ze sprzężeniem zwrotnym od pomiaru wielkości stabilizowanej.



Rys. 3. Układ stabilizacji zawartości popiołu w mieszance z kompensacją zakłócenia i ze sprzężeniem zwrotnym od pomiaru sygnału wyjściowego
Fig. 3. Control system for stabilisation of ash content in a coal blend with compensation of disturbances and a feedback from the output signal

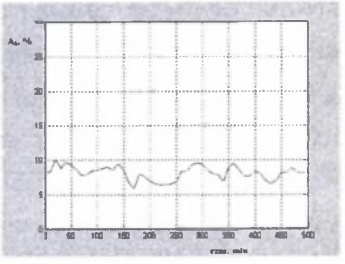
4. Analiza efektów stabilizacji zawartości popiołu w mieszance

Istotnym problemem w obu przedstawionych układach sterowania są błędy pomiarowe popiołomierza radiometrycznego, który w pierwszym przypadku mierzy zawartość popiołu w miale surowym, a w drugim – zawartość popiołu w mieszance. Istnieją dwa rodzaje błędów pomiarowych popiołomierza : błędy metody (wpływ zmiennego składu chemicznego węgla, jego uziarnienia, zawartości wilgoci itp.) oraz błędy statystyczne, wynikające ze stochastycznego charakteru promieniowania jądrowego, którego średnie natężenie jest zależne od zawartości popiołu. Błędy statystyczne można zmniejszać poprzez wydłużenie czasu pomiaru statystycznego ciągu impulsów na wyjściu głowicy pomiarowej popiołomierza. Pogarszają się wtedy własności dynamiczne popiołomierza jako urządzenia pomiarowego [2]. W praktyce istotniejsze są błędy metody, zwykle o rząd większe od błędów statystycznych. Błędy pomiarowe popiołomierza w przypadku pomiaru stosunkowo jednorodnego materiału, jakim jest miał surowy, mieszczą się w zakresie 0,6 – 1,3 % zawartości popiołu, natomiast w przypadku niejednorodnych materiałów, jakimi są mieszanki, błąd ten mieści się w zakresie 1,0 – 1,8% zawartości popiołu. Wynika z tego, że można spodziewać się innych efektów działania popiołomierza w układzie z kompensacją

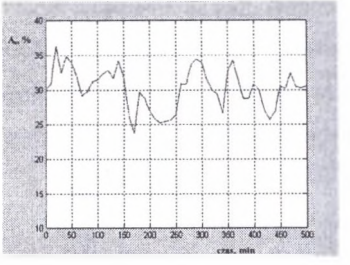
zakłóceń i w układzie ze sprzężeniem zwrotnym. Analizę działania układów przeprowadzono z zastosowaniem modelu symulacyjnego wykonanego z zastosowaniem oprogramowania Matlab (Simulink). W obu układach sterowania przyjęto następujące założenia:

- błąd pomiarowy popiołomierza będzie symulowany w postaci zakłócenia stochastycznego o odchyleniu standardowym z zakresu 0,6 – 1,8% oraz w funkcji autokorelacji $R_s(\tau) = \sigma^2 \exp(-0{,}01\tau)$, podawanego do węzła wartości zadanej,
- zmienność zawartości popiołu w koncentracie jest opisana procesem stochastycznym stacjonarnym w funkcji autokorelacji $R_k(\tau) = 1 \exp(-0{,}01\tau)$,
- pozostałe parametry układu jak w p.1.

Symulowane zmiany zawartości popiołu w koncentracie i miale surowym przedstawione są na rys. 4 i 5.

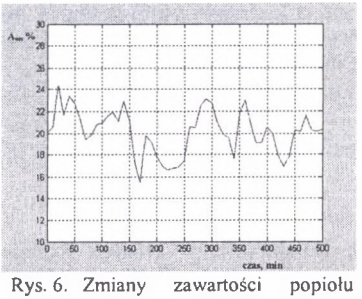


Rys. 4. Zmiany zawartości popiołu w koncentracie
Fig. 4. Variations of ash content in a concnetrate

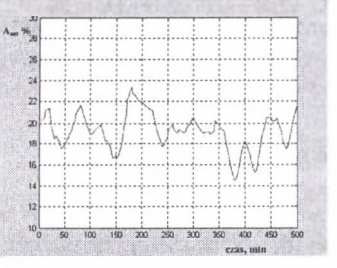


Rys. 5. Zmiany zawartości popiołu w miale
Fig. 5. Variations of ash content in raw fines

Wpływ zakłóceń $A_k(t)$ I $A_s(t)$ na efekty stabilizacji zawartości popiołu w mieszance $A_m(t)$ w układzie kompensacji zakłóceń i w układzie ze sprzężeniem zwrotnym przedstawiono na rys. 6, 7 i 8. Na rysunku 6 przedstawiono zmiany zawartości popiołu w układzie bez sterowania.



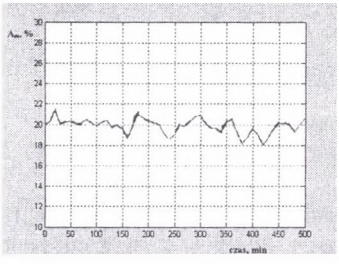
Rys. 6. Zmiany zawartości popiołu w mieszance w układzie bez sterowania
Fig. 6. Variations of ash content in the blend without control



Rys. 7. Zmiany zawartości popiołu w mieszance w układzie ze sprzężeniem zwrotnym
Fig. 7. Variations of ash content in the blend in the closed loop system

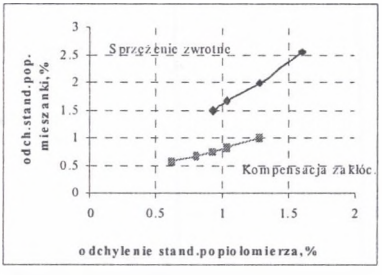
W tym przypadku odchylenie standardowe zawartości popiołu w mieszance wynosi 1.8% popiołu. Po wprowadzeniu układu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym uzyskujemy na pozór nieoczekiwany wynik wzrostu fluktuacji zawartości popiołu do 2,54%. Jest to spowodowane dodaniem się do błędów regulacji całkowitego błędu pomiaru popiołomierza radiometrycznego, który w tym przypadku został przyjęty na poziomie 1,6% (odchylenie standardowe). Na rysunku 8 przedstawiono przebieg zmian zawartości popiołu w mieszance w układzie z kompensacją zakłóceń. W tym przypadku założono, ze błąd pomiarowy popiołomierza wynosił 0,93% (odchylenie standardowe). Na rysunku 9 pokazano zestawienie wyników symulacji pracy obu układów dla różnych założonych błędów pomiarowych popiołomierza radiometrycznego.

Odchylenie standardowe zmian zawartości popiołu w mieszance rośnie ze wzrostem błędu pomiaru popiołomierza. Wzrost ten jest powolniejszy (a sam błąd regulacji mniejszy) dla układu z kompensacją zakłóceń niż dla układu ze sprzężeniem zwrotnym. W analizowanym przypadku błąd regulacji dla układu z kompensacją zakłóceń wynosił 0,54% popiołu w mieszance.



Rys. 8. Zmiany zawartości popiołu w mieszance w układzie z kompensacją zakłóceń

Fig. 8. Variations of ash content in the blend in the feed-forward system



Rys. 9. Zależność odchylenia standardowego zmian zawartości popiołu w mieszance od odchylenia standardowego błędu pomiaru popiołomierza

Fig. 9. Standard deviation of ash content in the blend as a function of the standard deviation of the ash monitor measurement error

5. Wnioski

Proste układy produkcji mieszanek węgla z dwóch składników, w których istnieje możliwość sterowania przepływem tylko jednego składnika, mogą być projektowane jako układy z tzw. kompensacją zakłóceń, układy ze sprzężeniem zwrotnym lub jako układy mieszane. Zalety układów z kompensacją zakłóceń polegają na eliminacji lub zmniejszeniu opóźnień transportowych i pomiarowych (popiołomierz), które mają wpływ na niekorzystne

działanie w przypadku układu zamkniętego z opóźnieniem transportowym. Również statyczne błędy pomiarowe urządzeń (popiołomierza) mogą mieć mniejszy wpływ na całkowite błędy regulacji w przypadku układów z kompensacją zakłóceń. Układy z kompensacją zakłóceń mogą być wprowadzane stopniowo (kompensacja jednego, dwóch lub trzech zakłóceń). Układy kompensacji zakłóceń mogą w wielu przypadkach lepiej stabilizować jakość produktu w procesach mieszania węgli niż układy ze sprzężeniem zwrotnym.

Układy sterowania ze sprzężeniem od popiołomierza mierzącego zawartość popiołu w mieszance mają wszystkie zalety układu ze sprzężeniem zwrotnym w postaci ograniczenia wpływu zmian charakterystyk poszczególnych urządzeń pomiarowych i wykonawczych objętych pętlą sprzężenia zwrotnego. Problemy układu ze sprzężeniem zwrotnym polegają na trudnościach w poprawnym pomiarze popiołu w mieszance, która często bywa niejednorodnym, warstwowym materiałem. W tym przypadku błąd pomiaru zawartości popiołu może być znacznie większy niż np. błąd pomiaru zawartości popiołu w miale surowym (układ z kompensacją zakłócenia). Dodatkowym problemem jest osiągnięcie wystarczającej dynamicznej dokładności układu z opóźnieniem transportowym i pomiarowym. Struktura układu sterowania procesem produkcji mieszanek węgla powinna być projektowana z uwzględnieniem błędów pomiarowych popiołomierzy radiometrycznych. Najkorzystniejsze okazują się układy kombinowane łączące własności układów kompensacyjnych z układami ze sprzężeniem zwrotnym.

LITERATURA

1. Bachmann C.: Kontrola procesu i jakości w zakładach przeróbki mechanicznej węgla i rud przy zastosowaniu bezpośrednich przyrządów pomiarowych. Materiały XII Międzynarodowego Kongresu Przeróbki Węgla (ICPC), Kraków, 23-27 maja 1994. t.4, ss. 173 – 182.
2. Cierpisz S.: Zakłócenia w układach sterowania produkcji mieszanek węgla. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1997, nr 3 (320), ss. 28 – 33.
3. Cierpisz S.: Automatyzacja procesów przeróbki mechanicznej węgla. „Śląsk", Katowice 1980.
4. Fauth, G., Bachmann, C.: On-stream ash and moisture monitoring in utilities, coking and preparation plants. In: International symposium IAEA, Vienna, Austria, 5-8 Jun 1990.
5. Gonzales G.D: Soft sensors for processing plants. Proceedings of IPMM'99, Honolulu, July 10-15,1999.
6. Osborne D.G., Fonseca A.G.: Coal Preparation - The Past Ten Years. Coal Preparation 1992 Vol. 11, N. 3-4, ss. 115 – 143.

7. Woodward R.C.: Automated blending with an on-line coal analyzer. Paper presented at EPRI conference, Pittsburgh, PA, USA, 17-19 Oct 1989.

Recenzent: Dr Bolesław Czerw, EMAG Katowice

Abstract

Analysis of coal blend control systems with radiometric ash monitors has been presented in the paper. Two types of control systems were analysed: feed-forward control system with ash monitor measuring ash content in raw fines and closed loop control system with ash monitor measuring ash content in the final product (blend). Results of the control depend significantly on ash monitor accuracy, which is better in case of raw coal monitoring than in a case of coal blend monitoring. It is due to better consistency and uniformity of raw fines in comparison with the blend. In practice it can appear that better control results can be achieved in the feed-forward control system than in closed loop control system.