

Stanisław CIERPISZ
Politechnika Śląska, Gliwice

REGULACJA EKSTREMALNA UKŁADU WZBOGACALNIKÓW WĘGLA

Streszczenie. Produkcja koncentratów węgla energetycznego lub koksowego odbywa się często w równoległym układzie wzbogacalników cieczy ciężkich, osadzarek i flotacji. W układzie takim istnieje optymalny punkt pracy (ekstremum globalne), dla którego uzyskuje się maksymalną ilość koncentratu końcowego o zadanej zawartości popiołu. Przedstawiono propozycje układów sterowania maksymalizujących ilość produktu o zadanej zawartości popiołu opartych na algorytmach poszukiwania ekstremum, metodach analizy własności obiektu oraz metodach kompensacji zakłóceń wykorzystujących bazy wiedzy.

EXTREME CONTROL OF A SYSTEM OF COAL WASHERS

Summary. Concentrates of steam or coking coal are often produced in a system of parallel processes of coal separation in heavy media vessels, jigs and flotation. In such a system there usually exists an optimal point of work (global extremum) for which the maximum amount of the final concentrate with desired ash content can be obtained. The amount of concentrate for this point is usually greater by 3-8% of the concentrate yield obtained for practically applied parameters of technological circuits.

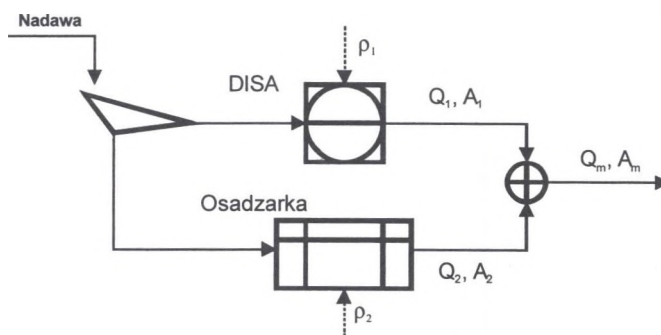
In the paper are discussed control systems based on search algorithms for the optimum point of operation, control feed-back systems and systems compensating disturbances including bases of operator's knowledge.

1. Wstęp

W zakładach węgla koksowego finalny produkt powstaje z połączenia koncentratów produkowanych w oddzielnych, równoległych procesach technologicznych. Często tak się dzieje również dla węgla energetycznych, w przypadku których stosowane jest wzbogacanie miazgi surowego w osadzarkach, a najdrobniejszych klas ziarnowych w procesie flotacji.

Istotnym problemem technologicznym jest zapewnienie stałej jakości produktów wzbogacania (zawartość popiołu, zawartość wilgoci, wartość opalowa) w warunkach zmiennych charakterystyk nadawy (skład ziarnowy, charakterystyka wzbogacalności) oraz zmiennej efektywności rozdziału maszyn wzbogacających. Poszczególne procesy technologiczne wyposaża się w układy automatyki poprawiające ich odporność na występujące zakłócenia, np. układy stabilizacji gęstości cieczy ciężkiej w procesach wzbogacania węgla grubego lub układy regulacji odbioru produktów dla osadzarek [3,5,6].

Przykładowy układ technologiczny produkcji koncentratu węgla przedstawiono na rys.1. W układzie tym węgiel wzbogacany jest w cieczach ciężkich oraz w osadzarkach. W obu wzbogacalnikach (DISA i osadzarka) możliwe jest wpływanie na gęstość rozdziału, decydującą o ilości i jakości koncentratu, poprzez zmianę gęstości cieczy ciężkiej (DISA) lub położenia pływaka sprzężonego z układem wygarniania odpadów (osadzarka). W tym drugim przypadku gęstość rozdziału jest znana jedynie pośrednio, niemniej na jej wzrost lub zmniejszenie można stosunkowo łatwo wpływać. Koncentraty węgla grubego i miału łączone są ze sobą, dając produkt finalny w danej klasie cennikowej (jakościowej) stosownie do umowy pomiędzy producentem i odbiorcą.



Rys. 1. Układ technologiczny równoległych wzbogacalników
Fig. 1. Technological system of washers in parallel

Produkcja końcowego koncentratu o zadanej np. zawartości popiołu może się odbywać przy różnych nastawach gęstości rozdziału w obu wzbogacalnikach, tak aby połączenie obu strumieni węgla opuszczających wzbogacalniki dawało produkt o żądanej zawartości popiołu.

Dalsza analiza wykaże, że powyższy układ technologiczny ma charakterystykę obiektu ekstremalnego, tzn. że przy zachowaniu zadanej zawartości popiołu w produkcie końcowym istnieje możliwość dobrania optymalnych gęstości rozdziału w obu wzbogacalnikach,

dających maksymalnie możliwą w danej sytuacji ilość tego produktu, a więc maksymalną wartość produkcji [1,2,4,7].



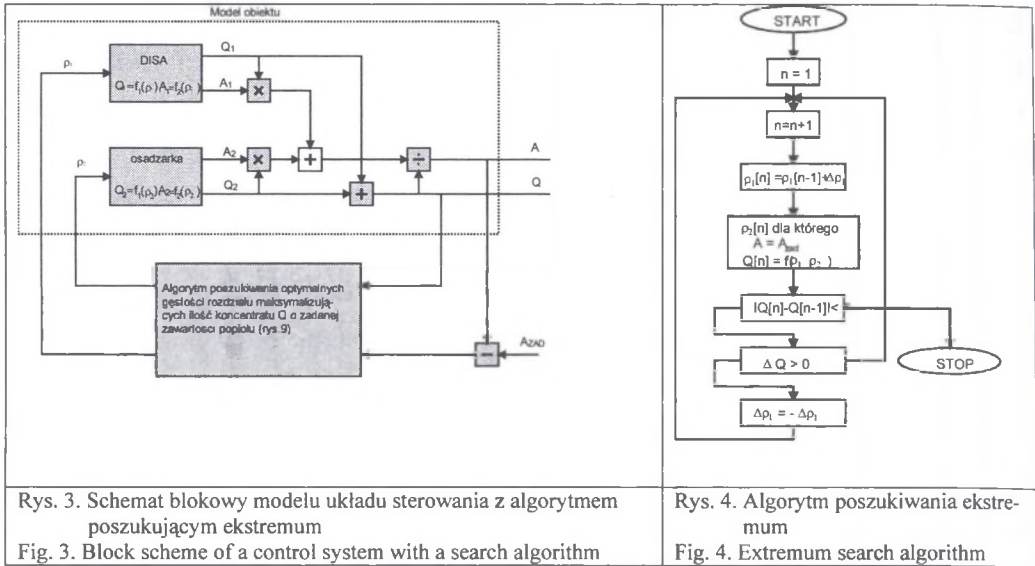
Rys. 2. Ekstremalna charakterystyka układu $q_m=q_m(\rho_1,\rho_2)$ dla stałej zadanej zawartości popiołu $a_m=6.5\%$ i 7%
 Fig. 2. Extreme characteristic of the system $q_m=q_m(\rho_1,\rho_2)$ for a desired ash content $a_m=6.5\%$ and 7%

Z wykresu przedstawionego na rys.2 widać, że krzywa ta ma ekstremum dla pewnej pary gęstości rozdziału ρ_1^{opt} i ρ_2^{opt} , które nazwiemy optymalnymi gęstościami rozdziału maksymalizującymi wychód koncentratu o zadanej zawartości popiołu. Na rys. 2 pokazano dla porównania zależności ilości mieszanki koncentratów od gęstości rozdziałów dla dwóch zadanych zawartości popiołu w mieszance. Zadaniem układu sterowania rozpatrywanym procesem technologicznym jest jednoczesna stabilizacja jakości końcowego produktu i utrzymywanie układu w ekstremalnym punkcie pracy (maksymalizującym ilość produktu) niezależnie od zakłóceń występujących w układzie technologicznym.

2. Metody sterowania optymalnego

2.1. Algorytmy poszukujące położenia optymalnego punktu pracy

Jedną z propozycji układu automatycznego sterowania, w którym poszukiwany jest optymalny punkt pracy układu, przedstawiona jest na rys.3. Zawartość popiołu w produkcie końcowym mierzona jest za pomocą popiołomierza radiometrycznego, a natężenie przepływu koncentratu wagą przenośnikową. Sygnały z tych urządzeń pomiarowych podawane są na wejścia sterownika, w którym realizowany jest algorytm poszukiwania optymalnych gęstości rozdziału. Sygnały wyjściowe sterownika podawane są do układów automatyki lokalnej wzbogacalnika DISA i osadzarki jako sygnały korygujące aktualne wartości gęstości rozdziału.



Istotnym zagadnieniem jest optymalizacja algorytmu poszukiwania ekstremalnego punktu pracy zmierzająca do zminimalizowania liczby kroków poszukiwania lub do znalezienia zastępczych zmiennych wyjściowych umożliwiających szybkie dojście układu w pobliże optymalnego punktu pracy. Ewentualna realizacja praktyczna takiego sposobu sterowania napotyka na bardzo duże trudności ze względu na opóźnienia i stałe czasowe występujące w układzie technologicznym i błędy pomiarowe zawartości popiołu w węglu.

2.2. Metody wykorzystujące własności obiektu sterowania

W pewnych przypadkach obiekt ekstremalny cechuje się wewnętrznymi zależnościami, które umożliwiają wykorzystanie ich do projektowania stosunkowo prostego układu sterowania utrzymującego układ w optymalnym punkcie pracy charakterystyki statycznej, a jednocześnie stabilizujący parametr jakościowy. Tak jest w przypadku rozpatrywanego układu technologicznego dwóch równoległych wzbogacalników, dla którego warunek istnienia ekstremum ilości produktu końcowego [1] o zadanej jakości sprowadza się do spełnienia warunku:

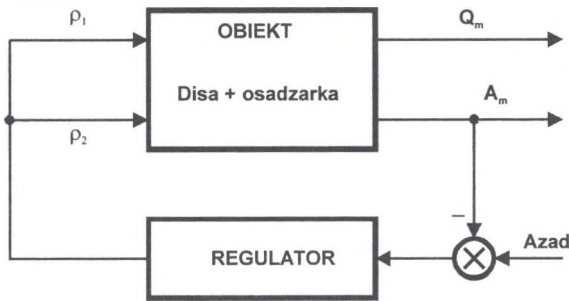
$$\frac{\partial[Q_1(\rho_1) \cdot A_1(\rho_1)]}{\partial Q_1(\rho_1)} = \frac{\partial[Q_2(\rho_2) \cdot A_2(\rho_2)]}{\partial Q_2(\rho_2)} \quad (1)$$

przy jednoczesnym warunku stabilizacji $A_m = A_{zad}$.

Warunek (1) oznacza, że gęstości rozdziału wzbogacalników ρ_1 i ρ_2 powinny być tak dobrane (w zależności od zakłóceń), aby stabilizacja zawartości popiołu w mieszance A_m odbywała się z zachowaniem warunku (1). Dla wzbogacalników idealnych o krzywej rozdziału prostokątnej (rozproszenie prawdopodobne $E_p = 0$) warunek (1) sprowadza się w uproszczeniu [1] do warunku równych gęstości rozdziału obu wzbogacalników:

$$\rho_1 = \rho_2 \quad (2)$$

Prowadzi to do propozycji prostego układu regulacji ze sprzężeniem zwrotnym, przedstawionego na rys.5, w którym jednocześnie jest spełniona praca układu w optymalnym punkcie charakterystyki statycznej niezależnie od występujących zakłóceń.



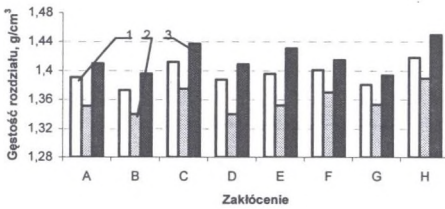
Rys. 5. Ekstremalne sterowanie w układzie ze sprzężeniem zwrotnym dla wzbogacalników idealnych
Fig. 5. Extreme control of the feed-back system for ideal washers

W praktyce wzbogacalniki są układami rzeczywistymi o efektywności technologicznej określonej krzywymi rozdziału, dla których warunek optymalnej pracy jest określony zależnością (1). W tym przypadku konieczna jest dalsza analiza układu technologicznego, która umożliwiłaby propozycje prostego układu sterowania. Na układ technologiczny przedstawiony na rys.1 działają zakłócenia w postaci zmian natężenia przepływu nadawy węgla surowego, zmian charakterystyki wzbogacalności węgla, zmian krzywej rozdziału maszyn wzbogacających. Okresowo zmieniane są również zadane zawartości popiołu w mieszance koncentratów. Dla różnych zakłóceń badano efekty sterowania przy równych gęstościach rozdziału osadzarki i wzbogacalnika DISA oraz przy optymalnych gęstościach rozdziału maszyn wzbogacających [8]. Badano wpływ następujących zakłóceń natężenia przepływu nadawy do wzbogacalników, charakterystyki wzbogacalności oraz imperfekcji maszyn, oznaczając stan odniesienia przez (A):

- względne zmiany wychodu frakcji (1.35-1.50 g/cm³) i (1.2-1.35 g/cm³) o ok.30% – stany (B) i (C),

- względne zmiany natężenia przepływu nadawy do obu wzbogacalników o ok.+30% i -30% – stany (D) i (E),
- względne zmiany imperfekcji osadzarki o ok.+20% i 20% – stany (F) i (G),
- jednoczesna zmiana ilości frakcji (C) i imperfekcji (F) – stan H.

Wpływ zakłóceń (A..H) na gęstości rozdziału wzbogacalników przedstawiono na rys.6 i 7. Widać, że analizowany zbiór zakłóceń wpływa w pewnym stopniu na gęstości rozdziału obu wzbogacalników, natomiast w mniejszym stopniu na różnicę ich gęstości, którą można przyjąć na średnim poziomie $\Delta\rho = 0,60 \text{ g/cm}^3$.

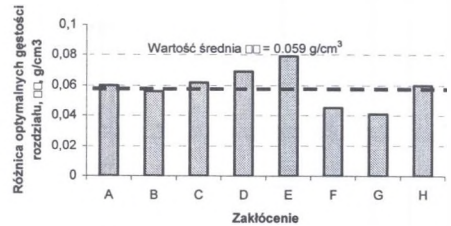


Rys. 6. Zależność gęstości rozdziału wzbogacalników dla różnych zakłóceń (A..H):

- 1 - równe gęstości rozdziału,
- 2 - optymalna gęstość rozdz. wzbog.DISA,
- 3 - optymalna gęstość rozdz. osadzarki

Fig. 6. Separation density of washers for different disturbances (A..H):

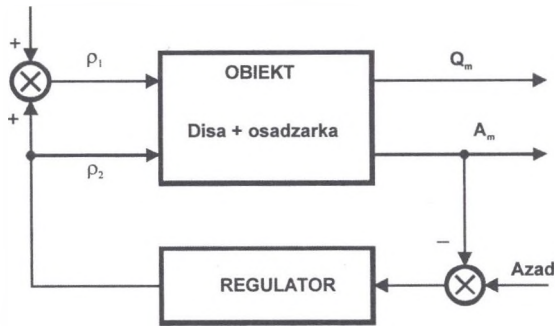
- 1 - equal separation densities,
- 2 - optimal sep.density for DISA,
- 3 - optimal sep.density for a jig



Rys. 7. Zależność różnicy optymalnych gęstości rozdziału wzbogacalników dla różnych zakłóceń

Fig. 7. Difference between optimal separation densities for different disturbances

Powyższa analiza wpływu zakłóceń (zmian ilości nadawy do układu technologicznego, udziału lekkiej frakcji w nadawie i imperfekcji osadzarki) na optymalną gęstość rozdziału prowadzi do skorygowanego układu sterowania przedstawionego na rys.8.



Rys. 8. Ekstremalne sterowanie w układzie ze sprzężeniem zwrotnym dla wzbogalników rzeczywistych

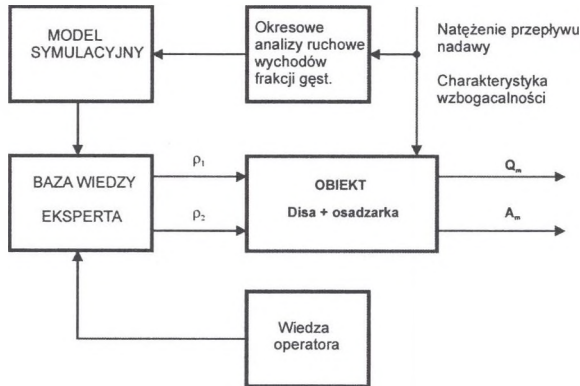
Fig. 8. Extreme control in a feed-back system for real washers

Praktyczna realizacja stosunkowo prostych układów regulacji ze sprzężeniem zwrotnym przedstawionych na rys.5 i 8 jest łatwiejsza od algorytmów poszukujących położenie optymalnego punktu pracy. Poważnym utrudnieniem są jednak błędy urządzeń pomiarowych, a szczególnie popiołomierzy radiometrycznych, które szacowane są na poziomie 0,5 – 1,0%A (w przypadku koncentratów węgla).

2.3. Metody kompensacji zakłóceń i sterowanie ekspertowe

Znaczna bezwładność rozpatrywanych układów technologicznych, opóźnienia transportowe oraz znaczne błędy urządzeń pomiarowych (wagi przenośnikowe, popiołomierze radiometryczne) sprawiają, że najbardziej interesujące wydają się być układy sterowania oparte na zasadzie kompensacji zakłóceń i układy ekspertowe wykorzystujące bazy wiedzy uzyskane z modeli symulacyjnych, korygowane w oparciu o wiedzę operatorów. Propozycja ekspertowego układu sterowania opartego na bazach wiedzy uzyskanych na podstawie wariantowej symulacji układu, okresowych pomiarów ruchowych oraz wiedzy operatorów przedstawiono na rys. 9.

W układzie tym przybliżona identyfikacja charakterystyki wzbogalności nadawy odbywa się na podstawie okresowych analiz ruchowych udziału trzech frakcji gęstościowych w nadawie, obliczeń symulacyjnych optymalnych gęstości rozdziału oraz ich korekty przez operatora uwzględniającej technologiczne możliwości korekty gęstości rozdziału.



Rys. 9. Układ sterowania z kompensacją zakłóceń i wykorzystaniem bazy wiedzy operatora
 Fig. 9. Control system with disturbance compensation and operator's knowledge base

3. Wnioski

Produkcja koncentratów węgla energetycznego lub koksowego odbywa się często w równoległym układzie wzbogacalników cieczy ciężkich i osadzarek. W układzie takim istnieje optymalny punkt pracy (ekstremum globalne), dla którego uzyskuje się maksymalną ilość koncentratu końcowego o zadanej zawartości popiołu. Wzrost ilości koncentratu uzyskiwanego w punkcie ekstremalnym w stosunku do praktycznych sposobów prowadzenia układu technologicznego może wynosić 1 - 4% wychodu koncentratu. Istnieje więc możliwość uzyskania istotnego zwiększenia ilości produkcji o zadanej jakości (cenie) uzasadniająca praktyczną realizację omawianego układu sterowania.

Układy sterowania maksymalizujące ilość koncentratu o zadanej jakości mogą wykorzystywać algorytmy poszukiwania optymalnego punktu pracy poprzez krokowe zmiany gęstości rozdziału w równoległych procesach wzbogacania węgla w cieczach ciężkich i osadzarkach. Takie algorytmy są trudne w praktycznej realizacji. Lepsze perspektywy mają klasyczne układy ze sprzężeniem zwrotnym wykorzystujące wiedzę o własnościach obiektu sterowania oraz układy kompensacji zakłóceń wykorzystujące bazy wiedzy o układzie technologicznym.

LITERATURA

1. Cierpisz S.: Maksymalizacja produkcji w systemach wzbogacania i tworzenia mieszanek węgla. Archiwum Górnictwa, tom 25, z. 1, 1980.
2. Salama A.I.A., Mikhail M.W.: Coal Preparation Plant Yield Maximization - 12th Coal Preparation Congress, Cracow 1994.
3. Couch G.R.: Coal preparation-automation and Control. IEA Coal Research, 1996.
4. Cierpisz S., Pielot J.: Optymalizacja procesów przeróbki węgla z zastosowaniem symulacji komputerowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej z. 231, Gliwice 1996.
5. Cierpisz S., Pielot J.: Analiza procesów przeróbki węgla z zastosowaniem symulacji komputerowej. MiAG nr 12 (317), grudzień 1996 (str. 24-31).
6. Cierpisz S.: Zakłócenia w układach sterowania produkcji mieszanek węgla. MiAG, nr 3 (320), marzec 1997 (str. 28-33).
7. Cierpisz S., Pielot J.: Metoda wyznaczania optymalnych wartości parametrów rozdziału procesów przeróbczych. MiAG, nr 6-7(323), czerwiec 1997.
8. Cierpisz S.: Parametry jakościowe węgla – pomiary i sterowanie. Monografia. Politechnika Śląska, Gliwice 2005.

Recenzent: Dr hab. inż. Kazimierz Trybalski, prof. nzw. AGH