

Roman KAULA, Joachim PIELOT
Politechnika Śląska, Gliwice

WYKORZYSTANIE ANALIZY WRAŻLIWOŚCI DO OCENY MAKSIMUM FUNKCJI CELU STEROWANIA W UKŁADZIE TECHNOLOGICZNYM PRZERÓBKI WĘGLA

Streszczenie. W artykule omówiono możliwość zastosowania analizy wrażliwości do oceny maksimum funkcji celu sterowania w układzie technologicznym przeróbki węgla. Dla przykładowego układu technologicznego wyznaczono optymalne wartości parametrów rozdziału oraz przedstawiono analizę wrażliwości w optymalnym punkcie pracy układu przy zmianie jednej zmiennej sterującej i optymalnych nastawach pozostałych wielkości.

SENSITIVITY ANALYSIS APPLICATION TO EVALUATION OF MAXIMUM OF CONTROL OBJECTIVE FUNCTION IN THE COAL PREPARATION TECHNOLOGICAL SYSTEM

Summary. In the paper a sensitivity analysis application possibility to evaluation of a maximum of a control objective function in the coal preparation technological system has been discussed. For a typical technological system optimum values of separation parameters were calculated. The sensitivity analysis at surround optimum setpoint of the technological system was carried out.

1. Wstęp

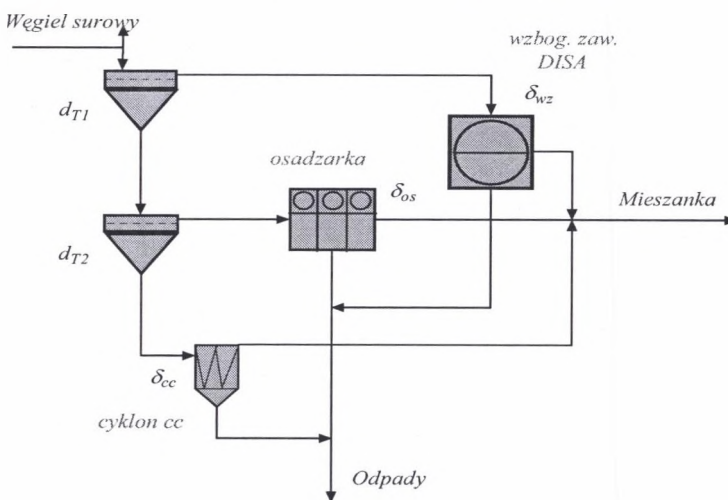
W układzie technologicznym zakładu przeróbki węgla istnieje możliwość sterowania rozdziałem węgla w poszczególnych operacjach przerobczych. Jednocześnie pojawia się jednak problem optymalnego sterowania (w sensie uzyskania np. maksymalnej wartości produkcji o zadanej jakości), jak i problem wyboru odpowiedniej struktury sterowań całego układu technologicznego. Problemy te są ze sobą ściśle powiązane: poprawna struktura sterowań jest warunkiem koniecznym optymalizacji bieżącej. Informacje dotyczące wpływu poszczególnych zmiennych sterowalnych na funkcję celu można uzyskać korzystając z

analizy wrażliwości [7, 8]. Wyniki takiej analizy pozwalają określić strukturę sterowań złożonego procesu technologicznego, uwzględniającą oddziaływanie interakcyjne zmiennych na tę funkcję.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie możliwości zastosowania analizy wrażliwości do oceny maksimum funkcji celu sterowania w układzie technologicznym przeróbki węgla. Dla przykładowego układu technologicznego wyznaczono najpierw optymalne wartości parametrów rozdziału [9], a następnie przedstawiono analizę wrażliwości w optymalnym punkcie pracy układu przy zmianie jednej zmiennej sterującej i optymalnych nastawach pozostałych wielkości [10].

2. Opis układu technologicznego

W przykładowym układzie technologicznym, przedstawionym na rys. 1 [9, 10], węgiel surowy po operacji przesiewania w układzie nadsobnym w przesiewaczach o wielkościach otworów sita d_{T1} i d_{T2} jest wzbogacany we wzbogacalniku zawieszinowym Disa, w osadzarce oraz w cyklonie cieczy ciężkiej, dzięki czemu uzyskiwane są koncentraty węgla grubego i miału. Koncentraty te są następnie łączone ze sobą, tworząc produkt końcowy o nazwie *Mieszanka*. Produkty ciężkie ze wszystkich wzbogacalników również są łączone i stanowią odpady kamienne. Węgiel surowy jest opisany charakterystykami podanymi w tablicach 1 i 2.



Rys. 1. Schemat układu technologicznego mieszania koncentratów z trzech operacji wzbogacania grawitacyjnego

Fig. 1. Scheme of the technological system of concentrates blending from three gravity enrichment operations

Tablica 1

Charakterystyka składu ziarnowego węgla surowego

Wymiary ziarn klasy ziarnowej Mm	Udział klasy ziarnowej w nadawie %
200-30	29,90
30-10	24,90
10- 6	8,26
6- 3	9,22
3- 0,5	14,94
0,5-0,1	6,95
0,1-0	4,64

Tablica 2

Charakterystyka gęstościowo-jakościowa nadawy węgla surowego

Nr frakcji gęst.	Gęstość frakcji gęstościowej g/cm ³	Względny udział frakcji %	Zawartość popiołu %	Zawartość siarki całkowitej %	Wartość opałowa %
1	< 1,30	8,78	4,41	0,84	30 540
2	1,30 - 1,40	29,02	9,20	1,01	28 220
3	1,40 - 1,50	11,38	21,05	1,23	23 840
4	1,50 - 1,60	6,40	29,24	1,32	20 910
5	1,60 - 1,70	5,20	36,93	1,26	18 190
6	1,70 - 1,80	3,52	43,93	1,34	15 750
7	1,80 - 1,90	2,10	50,68	1,41	13 510
8	1,90 - 2,00	1,51	55,37	1,50	11 510
9	2,00 >	32,51	82,23	1,00	1 880

3. Maksymalizacja produkcji o określonej jakości

Wartość produkcji w złożonym układzie technologicznym zależy od wielu parametrów rozdziału, możliwe jest więc poszukiwanie jej maksimum. Zmiennymi parametrami rozdziału są tutaj gęstości rozdziału wzbogacalników δ_{wz} , δ_{os} i δ_{cc} oraz, w zakresie ograniczonym do etapów projektowania bądź modernizacji, wielkości otworów sit d_{T1} oraz d_{T2} . Wielkościami wyjściowymi są wychody produktów końcowych i ich parametry jakościowe (które wpływają na cenę jednostkową węgla [1, 2]).

Do obliczeń optymalizacyjnych wykorzystany został algorytm maksymalizacji produkcji o zadanej jakości, omówiony w pracach [4, 5, 7]. W wyniku obliczeń uzyskane zostały

następujące optymalne wartości parametrów rozdziału (z zaokrągleniem cenotwórczych parametrów jakościowych, takich jak w cennikach węgla):

$$\delta_{os} = 1,815 \text{ g/cm}^3, \quad \delta_{wz} = 1,915 \text{ g/cm}^3, \quad \delta_{cc} = 1,916 \text{ g/cm}^3,$$

$$d_{T1} = 15,0 \text{ mm}, \quad d_{T2} = 0,5 \text{ mm}.$$

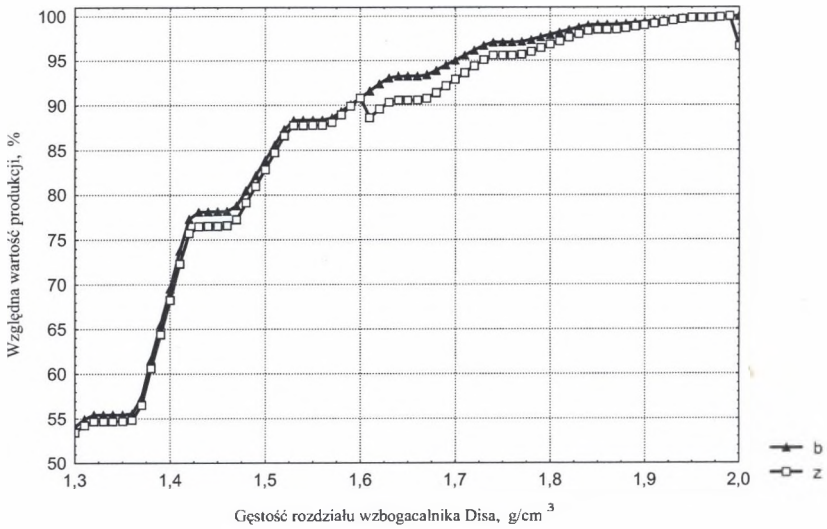
W tabelicy 3 przedstawione są wychody i parametry jakościowe obydwu produktów, uzyskane przy optymalnych wartościach parametrów rozdziału.

Tabela 3

Wychody i parametry jakościowe produktów

Produkt	Względny wychód % nadawy	Zawartość popiołu %	Zawartość siarki całkowitej %	Wartość opałowa kJ/kg
<i>Mieszanka</i>	65,69	17,99	1,12	25 100
<i>Odpady</i>	34,31	79,48	1,00	2 890

Zmiany gęstości rozdziału każdego wzbogacalnika wpływają na wartość produkcji, gdyż powodują zmiany wychodu produktów oraz parametrów jakościowych koncentratu. W przypadku zaokrąglenia cenotwórczych parametrów jakościowych do wartości granicznych, takich jak w cennikach węgla (zawartości popiołu w górę co 1 %, wartości opałowej w dół co 1000 kJ/kg, zawartości siarki całkowitej w górę co 0,2 %), obserwuje się niemonotoniczny wzrost wartości produkcji w całym zakresie zmian gęstości rozdziału. Obniżanie się wartości produkcji wynika ze skokowego zmniejszania się ceny jednostkowej węgla przy przekroczeniu granicznych wartości cenotwórczych parametrów jakościowych. Na kolejnych rysunkach pokazane są zmiany wartości produkcji przy zmianach gęstości rozdziału wzbogacalnika zawieszinowego (rys. 2), osadzarki (rys. 3) oraz cyklonu cieczy ciężkiej (rys. 4).

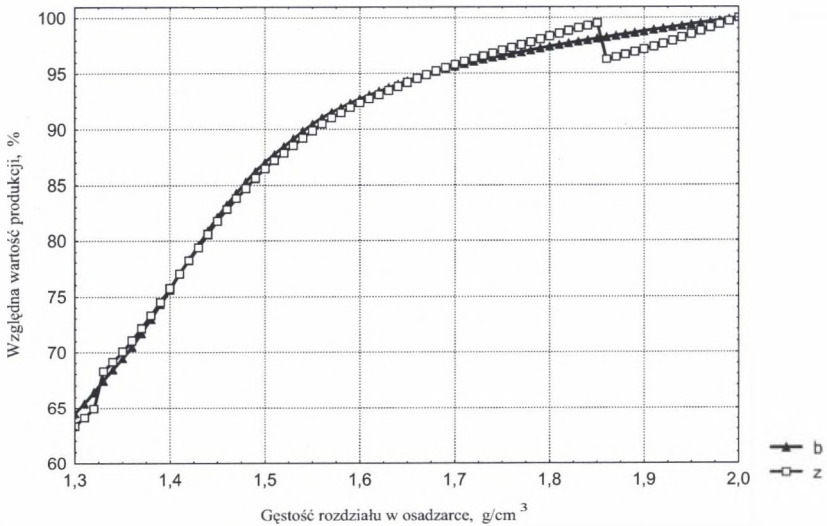


Rys. 2. Względna wartość produkcji przy zmianach gęstości rozdziálu δ_{rz} wzbogacalnika zawieszinowego Disa ($\delta_{os}=1,815 \text{ g/cm}^3$, $\delta_{cc}=1,916 \text{ g/cm}^3$)

b – bez zaokrąglania, z – z zaokrąglaniem cenotwórczych parametrów jakościowych

Fig. 2. Relative production value at density separation changes δ_{rz} in heavy media separator Disa ($\delta_{os}=1,815 \text{ g/cm}^3$, $\delta_{cc}=1,916 \text{ g/cm}^3$)

b – without rounding, z – with rounding qualitative parameters having influence on coal price

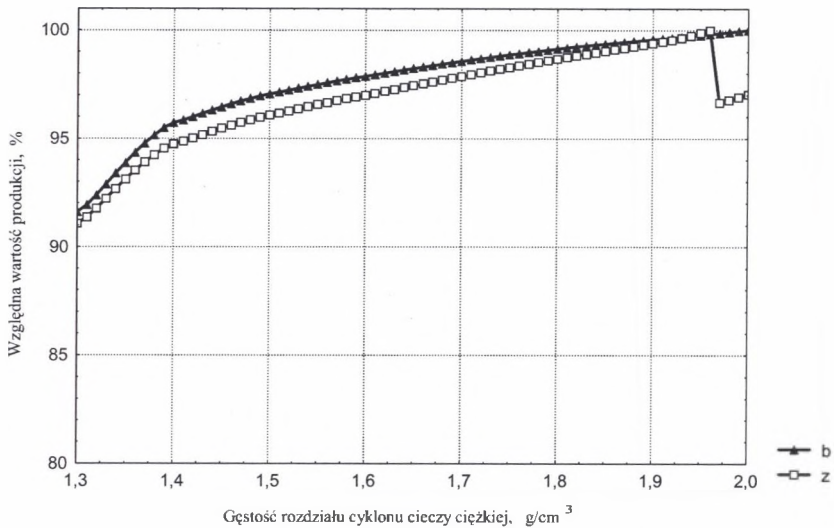


Rys. 3. Względna wartość produkcji przy zmianach gęstości rozdziálu δ_{os} w osadzarce ($\delta_{rz}=1,915 \text{ g/cm}^3$, $\delta_{cc}=1,916 \text{ g/cm}^3$)

b – bez zaokrąglania, z – z zaokrąglaniem cenotwórczych parametrów jakościowych

Fig. 3. Relative production value at density separation changes δ_{os} in jig ($\delta_{rz}=1,915 \text{ g/cm}^3$, $\delta_{cc}=1,916 \text{ g/cm}^3$)

b – without rounding, z – with rounding qualitative parameters having influence on coal price



Rys. 4. Względna wartość produkcji przy zmianach gęstości rozdziálu δ_{cc} w cyklonie cieczy ciężkiej ($\delta_{cc}=1,915 \text{ g/cm}^3$ oraz $\delta_{cc}=1,815 \text{ g/cm}^3$)

b – bez zaokrąglania, z – z zaokrąglaniem cenotwórczych parametrów jakościowych

Fig. 4. Relative production value at density separation changes δ_{cc} in heavy media cyclone

($\delta_{cc}=1,915 \text{ g/cm}^3$ oraz $\delta_{cc}=1,815 \text{ g/cm}^3$)

b – without rounding, z – with rounding qualitative parameters having influence on coal price

4. Analiza wrażliwości cząstkowej

Analiza wrażliwości jest związana z oceną wpływu poszczególnych zmiennych wejściowych x na wyjścia y układu sterowania. Dysponując opisem analitycznym modelu układu $y=f(x)$, przyjmując funkcję celu $J=f(x)$ jako jedno z wyjść układu, wrażliwość pierwszego rzędu (cząstkowa) S_k zmiennej x_k określa się jako pochodną cząstkową funkcji celu względem tej zmiennej [8]:

$$S_k = \frac{\partial J(x)}{\partial x_k} \quad (1)$$

gdzie:

S_k – wrażliwość cząstkowa funkcji celu względem $J(x)$ określonej zmiennej x_k ,

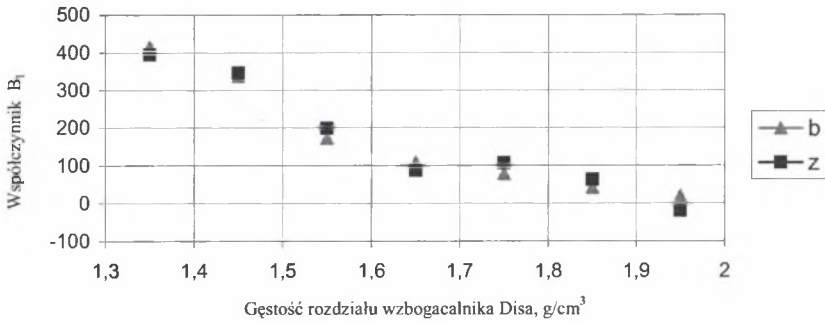
J – funkcja celu sterowania,

x_k , – zmienna sterująca o indeksie k

W układach technologicznych przeróbki węgla nie istnieje dokładny opis funkcyjny zależności pomiędzy zmiennymi sterującymi i funkcją celu, a jedynie zbiór punktów pracy

układu uzyskany (pomiarowo lub symulacyjnie) przy różnych wartościach zmiennych sterujących. W przypadku braku opisu analitycznego wiążącego wejścia z wyjściem stosuje się często inne metody wyznaczania wskaźników wrażliwości. Jedną z takich metod, zastosowaną także przez autorów, jest metoda analizy regresji [7, 8]. Wskaźniki wrażliwości cząstkowej można wyznaczyć za pomocą modelu regresji pierwszego rzędu.

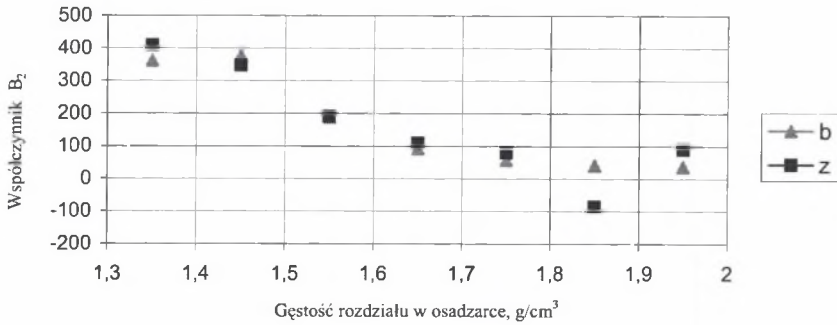
W rozpatrywanym układzie analizę wrażliwości przeprowadzono przy uwzględnieniu w modelu wrażliwości zmiennych sterujących δ_{wz} , δ_{os} , δ_{cc} przy stałej wielkości otworów sit przesiewawczy d_{T1} , d_{T2} . W analizie założono zmianę jednej ze zmiennych sterujących przy optymalnych nastawach pozostałych dwóch zmiennych. Jako optymalny punkt pracy układu przyjęto wyznaczone w p. 4 wartości gęstości rozdziału wzbogacalników: zawieszinowego, w osadzarce i cyklonu cieczy ciężkiej oraz wielkości otworów sit przesiewawczy. Wskaźniki wrażliwości cząstkowej poszczególnych zmiennych sterujących były określone w wąskich przedziałach zmian tych zmiennych. Rozpatrzono przypadki zmian w przedziałach: 1,3-1,4 g/cm^3 , 1,4-1,5 g/cm^3 ... 1,9-2,0 g/cm^3 . Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 5-7 odpowiednio dla kolejnych wzbogacalników.



Rys. 5. Wskaźniki wrażliwości cząstkowej przy zmianach gęstości rozdziału wzbogacalnika zawieszinowego Disa ($\delta_{os}=1,815 \text{ g/cm}^3$, $\delta_{cc}=1,916 \text{ g/cm}^3$)

Fig. 5. Partial sensitivity indices at density separation changes of heavy media separator Disa ($\delta_{os}=1,815 \text{ g/cm}^3$, $\delta_{cc}=1,916 \text{ g/cm}^3$)

b – without rounding, z – with rounding qualitative parameters having influence on coal price

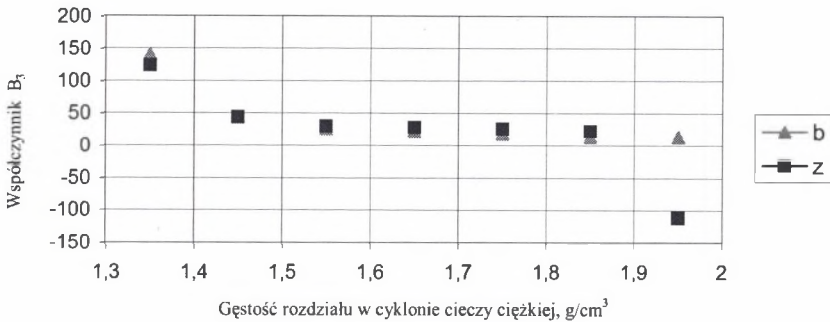


Rys. 6. Wskaźniki wrażliwości cząstkowej przy zmianach gęstości rozdziału w osadzarce ($\delta_{wz}=1,915 \text{ g/cm}^3$, $\delta_{zc}=1,916 \text{ g/cm}^3$)

b – bez zaokrąglania, z – z zaokrąglaniem cenotwórczych parametrów jakościowych

Fig. 6. Partial sensitivity indices at density separation changes in jig ($\delta_{wz}=1,915 \text{ g/cm}^3$, $\delta_{zc}=1,916 \text{ g/cm}^3$)

b – without rounding, z – with rounding qualitative parameters having influence on coal price



Rys. 7. Wskaźniki wrażliwości cząstkowej przy zmianach gęstości rozdziału w cyklonie cieczy ciężkiej ($\delta_{wz}=1,915 \text{ g/cm}^3$ oraz $\delta_{os}=1,815 \text{ g/cm}^3$)

b – bez zaokrąglania, z – z zaokrąglaniem cenotwórczych parametrów jakościowych

Fig. 7. Partial sensitivity indices at density separation changes in heavy media cyclone ($\delta_{wz}=1,915 \text{ g/cm}^3$ oraz $\delta_{os}=1,815 \text{ g/cm}^3$)

b – without rounding, z – with rounding qualitative parameters having influence on coal price

Wartości wskaźników wrażliwości zmniejszają się wraz ze zbliżaniem się do optymalnej nastawy rozpatrywanej zmiennej sterującej. Dla wartości produkcji (funkcji celu sterowania), obliczanej bez zaokrąglania cenotwórczych parametrów jakościowych, wskaźniki wrażliwości konkretnych zmiennych sterujących, wyznaczone dla układu w pobliżu optymalnego punktu pracy, osiągają wartości najmniejsze. Wynika to z faktu, że maksimum funkcji celu znajduje się na krańcach rozpatrywanych przedziałów zmian gęstości rozdziału (rys. 2-4). Natomiast wskaźniki wrażliwości w otoczeniu optimum, dla przypadków obliczeń z zaokrąglaniem cenotwórczych parametrów jakościowych, przyjmują wartości ujemne

(ujemne wartości parametrów β_i modelu regresji). Efekt ten występuje dla gęstości rozdziału w osadzarce w przedziale 1,8-1,9 g/cm³ (rys.6), natomiast dla gęstości rozdziału wzbogacalnika DISA i cyklonu cieczy ciężkiej w przedziale 1,9-2,0 g/cm³ (odpowiednio rys. 5 i rys.7).

Uzyskane wyniki są zbieżne z wynikami obliczeń optymalizacyjnych przedstawionych w punkcie 3. Różnice w wynikach dla przypadków obliczania wartości produkcji bez zaokrąglania i z zaokrągleniem cenotwórczych parametrów jakościowych można wyjaśnić na podstawie analizy rys. 2-4. Krzywe (opisujące funkcję celu sterowania) przedstawione na tych rysunkach, w przypadkach zaokrąglania cenotwórczych parametrów jakościowych, mają maksimum globalne wewnątrz przedziału rozpatrywanych zmian gęstości. Pochodna cząstkowa funkcji celu względem określonej zmiennej w otoczeniu takiego punktu zmienia znak od wartości dodatniej do ujemnej (w optymalnym punkcie jest równa zero).

5. Podsumowanie

Uzyskane oceny maksimum funkcji celu dwiema przedstawionymi metodami są ze sobą zbieżne, co potwierdza słuszność stosowania każdej metody.

Analizę wrażliwości prowadzi się często nie tylko w celu określenia wartości liczbowej wskaźników wrażliwości cząstkowej (odpowiedników pochodnych cząstkowych), ale także określenia ich znaku [8]. Wiadomo, że zmiana znaku wskaźnika wrażliwości w określonym punkcie pracy układu pozwala określić kierunek zmian funkcji celu pod wpływem zmiany określonej zmiennej sterującej. Informacja ta może być użyteczna w projektowaniu i analizie w celu określenia optymalnej strategii sterowania układem. Analiza wrażliwości może być łączona z różnymi algorytmami optymalizacyjnymi, w których funkcja celu stopniowo zbliża się do wartości ekstremalnej.

LITERATURA

1. Blaschke W., Blaschke S.A., Grudziński Z.: System cen energetycznego węgla kamiennego a opłacalność jego wzbogacania. Przegląd Górniczy 1997, nr 1, ss. 21-33.
2. Blaschke W., Mokrzycki E., Shan Z.: Ekonomia przeróbki węgla kamiennego. Materiały XII Międzynarodowego Kongresu Przeróbki Węgla (ICPC), Kraków, 23-27 maja 1994, t.5, ss. 101-121.

3. Cierpisz S.: Automatyizacja procesów przeróbki mechanicznej węgla. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1980.
4. Cierpisz S., Pielot J.: Komputerowy model symulacyjny procesów przeróbki mechanicznej węgla – zastosowanie w systemach dyspozytorskiego sterowania. V Międzynarodowa Konferencja Przeróbki Kopalni, Wysowa Zdrój, 27-29 września 1999, Gospodarka Surowcami Mineralnymi 1999, t.15, ss. 265-282.
5. Cierpisz S., Pielot J.: Symulacyjne statyczne modele procesów i układów sterowania w zakładach wzbogacania węgla. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 28, Gliwice 2001.
6. Goodman F., McCreery J.: Coal Preparation Computer Model. Vol.I. U.S. Environmental Protection Agency, Washington 1980.
7. Kaula R., Pielot J.: Zastosowanie analizy wrażliwości do optymalnego sterowania procesów przeróbki węgla. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1480, seria Górnictwo, z. 246, Gliwice 2000, s.303-314.
8. Kaula R., Pielot J.: Metoda wyznaczania optymalnej struktury sterowań układów technologicznych przeróbki węgla. Monografia nr 47, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
9. Kaula R., Pielot J.: Zagadnienia sterowania produkcją w układzie technologicznym procesów przeróbki węgla. Archiwum Górnictwa (w druku).
10. Kaula R., Pielot J.: Zastosowanie analizy wrażliwości w układzie technologicznym procesów przeróbki węgla. Archiwum Górnictwa (w druku).
11. Pielot J.: Maksymalizacja produkcji w sterowaniu procesów przeróbki mechanicznej węgla. Materiały V Konferencji Automatyizacji Procesów Przeróbki Mechanicznej Węgla, Szczyrk, 5-8 maja 1999, ss.145-158.

Recenzent: Dr hab. inż. Kazimierz Jaracz, prof. nzw. w AP w Krakowie

Abstract

In the paper a sensitivity analysis application possibility to evaluation of a maximum of a control objective function in the coal preparation technological system has been discussed. In a technological system of coal preparation plant exists a possibility of a optimum control of a production value. For a typical technological system optimum values of separation parameters were calculated. It was realized by simulation program of coal preparation processes. The basic notations of the sensitivity analysis have been presented. The sensitivity analysis in the optimum setpoint of the technological system at change of one control variable and an optimum setting of other variables was carried out.