

Roman KAULA, Joachim PIELOT
Politechnika Śląska, Gliwice

ZASTOSOWANIE ANALIZY WRAŻLIWOŚCI DO OPTIMALNEGO STEROWANIA PROCESÓW PRZERÓBKI WĘGLA

Streszczenie. W referacie przedstawiono przykład wyznaczania optymalnej struktury sterowania złożonego układu technologicznego zakładu przeróbki węgla. Metodyka postępowania polegała na powiązaniu analizy wrażliwości z wyznaczaniem maksimum funkcji celu (rozumianego jako maksimum wartości produkcji o zadanej jakości). Dla danego złożonego układu technologicznego zostały przeprowadzone następujące etapy analizy: wstępna analiza wrażliwości, poszukiwanie maksimum funkcji celu, sprawdzająca analiza wrażliwości.

SENSITIVITY ANALYSIS APPLICATION TO OPTIMAL CONTROL OF COAL PREPARATION PROCESSES

Summary. In the paper the example of a sensitivity analysis application to optimal control structure determining of a complex technological system of a coal preparation process has been presented.

1. Wstęp

Węgiel surowy dostarczany do zakładu przeróbki zostaje w nim odpowiednio przetworzony w celu uzyskania produktów o określonej kontraktami handlowymi jakości. Wymagane parametry jakościowe produktów ulegają zmianom, a ponadto charakterystyki ilościowo-jakościowe węgla surowego mogą się istotnie zmieniać i to zarówno w krótkim, jak i w długim horyzoncie czasowym.

Aby otrzymać produkty handlowe o określonych parametrach, układ technologiczny zakładu przeróbki zawiera z reguły kilka głównych operacji przerobczych: przesiewania, wzbogacania grawitacyjnego (we wzbogacalnikach z cieczą ciężką, osadzarkach i hydrocyklonach), wzbogacania flotacyjnego, rozdzielania strumieni i produkcji mieszanek. W takim układzie istnieje możliwość sterowania rozdziałem węgla w poszczególnych operacjach. Jednocześnie pojawia się jednak problem optymalnego sterowania (w sensie uzyskania np.

maksymalnej wartości produkcji o zadanej jakości), jak i problem wyboru odpowiedniej struktury sterowania całego układu technologicznego. Problemy te są ze sobą ściśle powiązane - poprawna struktura sterowania jest warunkiem koniecznym optymalizacji bieżącej.

W referacie przedstawiono przykład wyznaczania optymalnej struktury sterowania złożonego układu technologicznego zakładu przeróbki węgla.

2. Pojęcie analizy wrażliwości

Jednym z ważnych problemów występujących w zagadnieniach sterowania złożonym układem technologicznym jest ustalenie struktury sterowania. Przez strukturę sterowania rozumiemy przyjęcie zbioru zmiennych sterujących, mających decydujący wpływ na przyjętą funkcję celu $J = f(x_1, x_2, \dots, x_h, \dots, x_n)$. Liczba zmiennych sterujących powinna być możliwie mała, bowiem sterowanie układu o dużej liczbie zmiennych jest trudne nawet przy obecnym rozwoju techniki obliczeniowej. Związane to jest przede wszystkim z trudnościami identyfikacji procesu.

Ograniczenia liczby zmiennych sterujących dokonuje się na podstawie analizy wrażliwości $S_h = \frac{\partial J}{\partial x_h}$ zmiennych ze względu na przyjętą funkcję celu sterowania [4].

Analiza wrażliwości może stanowić podstawę przy projektowaniu struktury sterowania. Pozwala na wybór takich zmiennych sterujących procesem technologicznym, które mają decydujący wpływ na funkcję celu.

Skuteczną metodą wyznaczania wpływu wielkości wejściowych na wyjście jest metoda podana w pracy [3], pozwalająca określić wrażliwość całkowitą S_{Th} dla każdego x_h , zdefiniowaną jako :

$$S_{Th} = S_h + \sum_{j \neq h} S_{hj} + \sum_{\substack{l \neq h \\ l \neq j}} \sum_{j \neq h} S_{hjl} + \dots \quad (1)$$

gdzie: S_h - parametr (wrażliwość) wyznaczony dla zmiennej h ,

S_{hj} - parametr uwzględniający wpływ zmiennych h, j ,

S_{hjl} - parametr uwzględniający wpływ zmiennych h, j, l .

Na przykład dla trzech zmiennych x całkowita wrażliwość zmiennej x_1 ma postać:

$$S_{T1} = S_1 + S_{12} + S_{13} + S_{123} \quad (2)$$

W celu wyznaczenia wartości S_h stosuje się metodę analizy regresyjnej. Model całkowity regresji wyraża się wtedy wzorem [5]:

$$J_i = \beta_0 + \sum_{b=1}^k \beta_b x_{ib} + \sum_{b < j}^k \beta_{bj} x_{ib} x_{ij} + \sum_{\substack{b < j \\ l < m}}^k \sum_{\substack{b < j \\ l < m}}^k \beta_{bjlm} x_{ib} x_{ij} x_{il} + \dots + E_i, \quad (3)$$

gdzie: $i=1 \dots n$; n – liczba rozpatrywanych odpowiedzi układu,

k – ilość zmiennych sterujących,

J – funkcja celu,

β_0 – wartość średnia,

β_h – współczynniki pierwszego rzędu,

β_{bj} – współczynniki interakcyjne pomiędzy dwoma wejściami,

β_{bjl} – współczynniki interakcyjne pomiędzy trzema wejściami,

$x_{h,j,l}$ – wartości standaryzowanych wejść (równanie 4),

E – błąd dopasowania modelu regresyjnego.

Standaryzacja wejść pozwala wyeliminować możliwe błędy związane z wyznaczeniem parametrów β .

$$\begin{aligned} x_{ih} &= (z_{ih} - b_h) / a_h \\ a_h &= (u_h - l_h) / 2 \\ b_h &= (u_h + l_h) / 2, \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie: z_{ih} – zmienna sterująca x_h nie standaryzowana dla przypadku i ,

u_h – największa wartość zmiennej h ,

l_h – najmniejsza wartość zmiennej h .

Dla tak wyznaczonych parametrów β wyznacza się wrażliwość S .

$$\begin{aligned} S_b &= |\beta_b| \\ S_{bj} &= |\beta_{bj}| \\ S_{bjl} &= |\beta_{bjl}| \end{aligned} \quad (5)$$

3. Wykorzystanie analizy wrażliwości do optymalnego sterowania układu technologicznego procesu wzbogacania węgla

Metodyka postępowania polegała na powiązaniu analizy wrażliwości z wyznaczaniem maksimum funkcji celu (rozumianego jako maksimum wartości produkcji o zadanej jakości).

Dla danego złożonego układu technologicznego zostały przeprowadzone następujące etapy analizy:

- wstępna analiza wrażliwości mająca na celu ustalenie istotności zmiennych decyzyjnych algorytmu maksymalizacji funkcji celu,
- poszukiwanie maksimum funkcji celu,
- ponowne przeprowadzenie analizy wrażliwości celem stwierdzenia, czy w wąskim obszarze otaczającym maksimum poszczególne zmienne sterujące mają podobny wpływ na zmiany wartości funkcji celu.

3.1. Przykładowy układ technologiczny

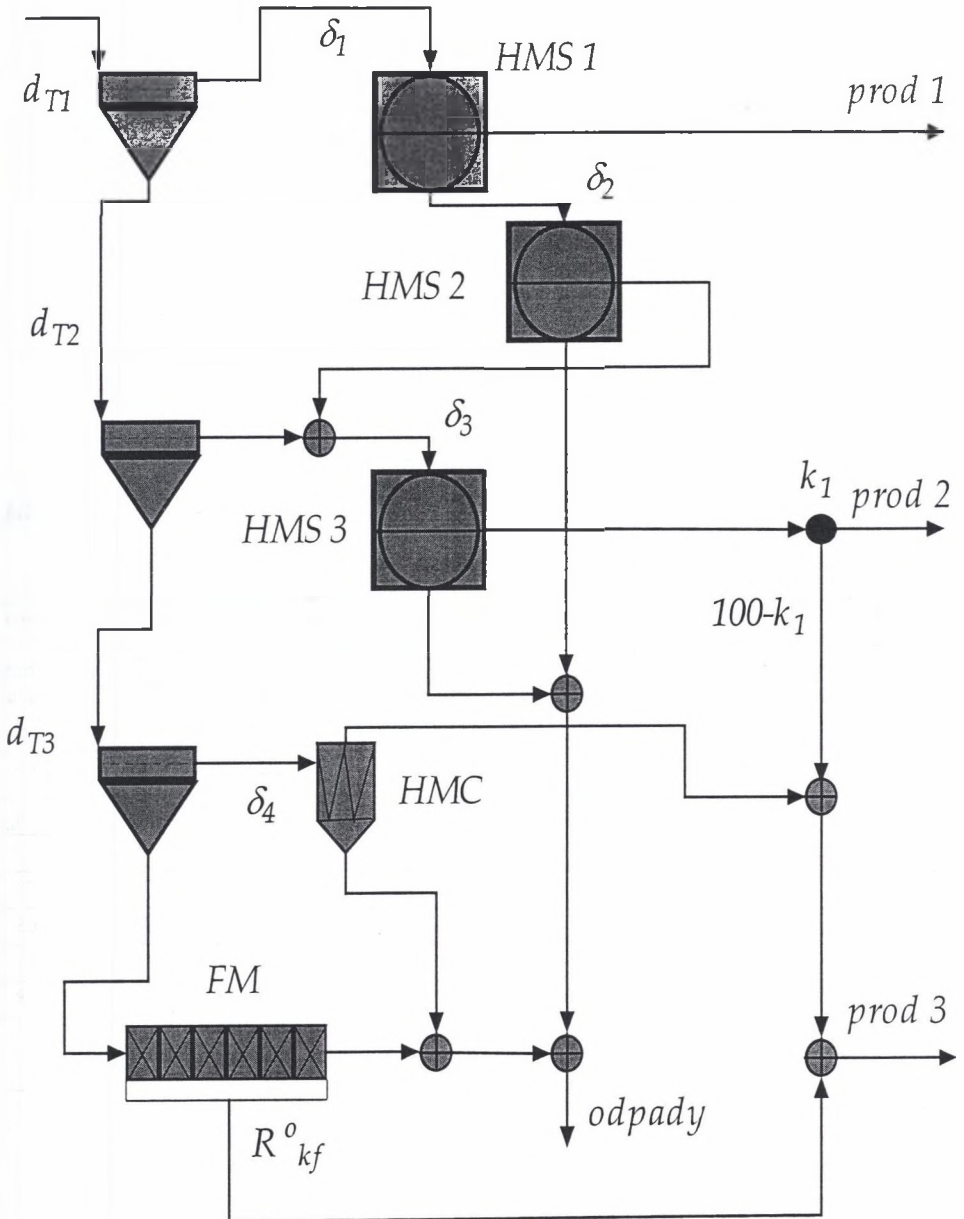
Przykładowy schemat złożonego układu technologicznego przedstawiony został na rys. 1.

W schemacie tym znajdują się symbole:

- przesiewaczy dwuproduktowych o wielkościach otworów sit d_{T1} , d_{T2} i d_{T3} ,
- wzbogacalników zawieszinowych HMS o gęstościach rozdziału δ_1 , δ_2 i δ_3 ,
- hydrocyklonu z cieczą ciężką HMC o gęstości rozdziału δ_4 ,
- flotownika FM , którego zmienną sterującą jest względny udział koncentratu flotacyjnego R^{okf} ,
- rozdzielacza strumienia koncentratu ze wzbogacalnika zawieszinowego $DISA 3$ o współczynniku podziału k_1 ,
- łączenia strumieni węgla, strumieni wyjściowych przedstawiających produkty końcowe – sortymenty handlowe ($prod 1$, $prod 2$, $prod 3$) i odpady kamienne ($odpady$).

Węgiel surowy jest klasyfikowany w układzie nadsobnym trzech przesiewaczy. Ziarna o wymiarach $d > d_{T1}$ (oraz ziarna mniejsze, stanowiące podziarno) są kierowane do wzbogacalnika zawieszinowego $HMS1$, którego koncentrat jest produktem handlowym o nazwie $prod 1$. Odpady tego wzbogacalnika, pozbawione ziarn o najmniejszej gęstości, są poddawane ponownemu wzbogacaniu we wzbogacalniku zawieszinowym $HMS2$, którego koncentrat i ziarna nadawy o wymiarach $d_{T2} < d < d_{T1}$ są wzbogacane we wzbogacalniku zawieszinowym $HMS 3$. Koncentrat z tego wzbogacalnika jest dzielony na dwa strumienie z odpowiednim współczynnikiem podziału k_1 ; pierwszy z tych strumieni stanowi produkt handlowy $prod 2$, drugi zaś strumień jest składnikiem mieszanki $prod 3$. Ziarna nadawy o wymiarach $d_{T3} < d < d_{T2}$ są wzbogacane w hydrocyklonie z cieczą ciężką, z którego koncentrat jest drugim składnikiem tej mieszanki. Ziarna nadawy o wymiarach $d < d_{T3}$ są wzbogacane flotacyjnie, a otrzymany koncentrat jest trzecim składnikiem mieszanki $prod 3$. Odpady ze wzbogacalników zawieszinowych $HMS2$ i $HMS3$ oraz hydrocyklonu i flotownika tworzą strumień wyjściowy o nazwie $odpady$.

Węgiel surowy



Rys.1. Schemat układu technologicznego
 Fig.1. Diagram of a technological system

Analiza składu ziarnowego węgla surowego podana jest w tabeli 1, zaś uśredniona dla wszystkich klas ziarnowych charakterystyka gęstościowo-jakościowa w tabeli 2.

Tabela 1

Charakterystyka składu ziarnowego

Wymiary ziarn klasy ziarnowej Mm	Udział klasy ziarnowej w nadawie %
200-120	1,35
120- 80	3,10
80- 50	5,62
50- 30	7,48
30- 18	9,98
18- 10	14,48
10- 0,5	48,97
0,5- 0	9,02

Tabela 2

Charakterystyki gęstościowo-jakościowe nadawy

Nr frakcji gęst.	Gęstość frakcji gęstościowej g/cm ³	Klasa ziarn. 200-80 mm		Klasa ziarn. 80-30 mm		Klasa ziarn. 30-0 mm	
		Względny udział frakcji %	Zawartość popiołu %	Względny udział frakcji %	Zawartość popiołu %	Względny udział frakcji %	Zawartość popiołu %
1	< 1,30	5,20	3,72	9,50	3,42	28,76	2,69
2	1,30 - 1,35	1,54	4,91	13,64	4,87	18,77	4,94
3	1,35 - 1,40	0,85	17,42	1,86	11,82	8,08	9,87
4	1,40 - 1,45	0,62	24,46	4,23	17,09	5,76	15,78
5	1,45 - 1,50	1,09	30,27	2,72	24,87	2,90	20,65
6	1,50 - 1,60	2,45	36,00	3,64	29,65	3,58	26,58
7	1,60 - 1,70	3,90	40,71	2,76	38,81	3,07	35,08
8	1,70 - 1,80	3,25	48,02	2,76	45,14	2,03	43,00
9	1,80 - 2,00	12,06	59,39	7,49	58,91	4,19	54,82
10	2,00 >	69,04	79,93	51,40	73,87	22,86	76,32

3.2. Wstępna analiza wrażliwości

Wstępna analiza wrażliwości ma na celu określenie wpływu zmiennych decyzyjnych w szerokim zakresie ich możliwych zmian na wartość funkcji celu. Pozwala ustalić istotność poszczególnych zmiennych decyzyjnych w algorytmie maksymalizacji funkcji celu.

Właściwy dobór kolejności zmiennych decyzyjnych w tym algorytmie skraca czas poszukiwań maksimum globalnego funkcji celu.

Założono, że w rozpatrywanym układzie technologicznym zbiór zmiennych sterujących stanowią cztery gęstości rozdziału:

- δ_1 – gęstość rozdziału wzbogacalnika HMS1,
- δ_2 – gęstość rozdziału wzbogacalnika HMS2,
- δ_3 – gęstość rozdziału wzbogacalnika HMS3,
- δ_4 – gęstość rozdziału hydrocyklonu HMC.

Jako kryterium sterowania przyjęto całkowitą wartość produkcji:

$$Wp(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4) = \sum_{k=1}^3 \Gamma s_k(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4) * Cj_k - \Gamma o(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4) * Kso, \quad (6)$$

gdzie: Wp – wartość produkcji,

Γs – wychód sortymentu handlowego,

Cj – cena jednostkowa tony węgla,

Γo – wychód odpadów,

Kso – koszt składowania odpadów.

Cena jednostkowa węgla została wyznaczona na podstawie formuły sprzedażnej węgla kamiennego przedstawionej w pracy [1] według następującego wzoru:

$$C_j = Cw_k * \left(1 - \frac{A - 6}{50} - \frac{S_t}{20} - \frac{W_t - 8}{100}\right) \quad (7)$$

gdzie: Cw_k – unormowana cena węgla wskaźnikowego, zł/Mg,

A – zawartość popiołu, %,

S_t – zawartość siarki dla węgla wskaźnikowego ($S_t=1\%$),

W_t – zawartość wilgoci dla węgla wskaźnikowego ($W_t=8\%$).

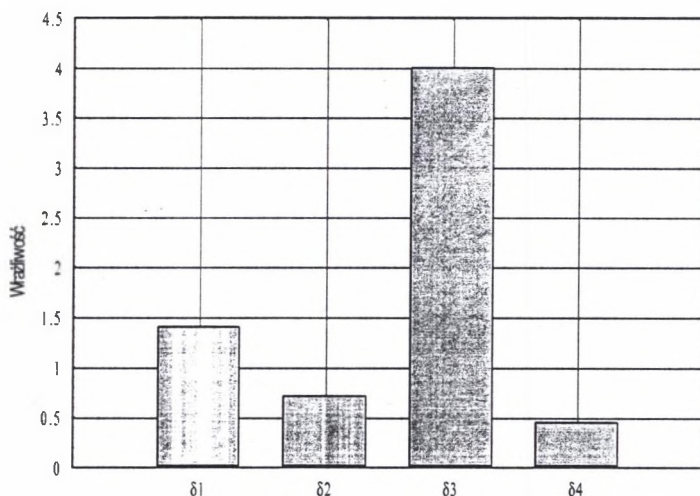
Dla podanego układu przeprowadzono analizę wrażliwości w przypadku zmian gęstości rozdziału wzbogacalników δ , w szerokim zakresie zmian zmiennych $\delta_1 - \delta_4$. Rozpatrywano zmiany parametrów sterujących co 0,1 g/cm³ w zakresie podanym w tabeli 3.

Tabela 3

Przedziały wartości gęstości rozdziału w układzie technologicznym

Operacja przerobcza	Gęstość rozdziału	Przedział wartości gęstości rozdziału
wzbogacanie w HMS1	δ_1	1,300-1,700 g/cm ³
wzbogacanie w HMS2	δ_2	1,500-1,900 g/cm ³
wzbogacanie w HMS3	δ_3	1,400-1,800 g/cm ³
wzbogacanie w hydrocyklonie z cieczą ciężką HMC	δ_4	1,500-1,900 g/cm ³

Otrzymano w ten sposób 625 ($n=5^4$) punktów pracy układu. Wartości udziałów i parametrów jakościowych strumieni produktów rozpatrywanego układu technologicznego, w zależności od zmian gęstości rozdziału, otrzymano na podstawie modelu symulacyjnego opisanego w pracy [6]. Współczynniki modelu regresyjnego pozwalające wyznaczyć wrażliwość poszczególnych zmiennych wejściowych na wybraną funkcję celu wyznaczono za pomocą programu Matlab. Otrzymane wyniki obliczeń zostały przedstawione na rys. 2.



Rys.2. Wpływ zmiennych decyzyjnych (gęstości rozdziału) na funkcję celu
Fig. 2. Decision variables influence (separation density) on the objective function

Standaryzacja zmiennych sterujących pozwoliła otrzymać względne wartości współczynników odpowiednich zmiennych. Wartości liczbowe wrażliwości poszczególnych zmiennych sterujących jednoznacznie określają dobór kolejności zmiennych w algorytmie optymalizacyjnym. Największy wpływ na wartość produkcji w rozpatrywanym układzie technologicznym ma zmienna δ_3 .

Parametr β_0 jest proporcjonalny do średniej wartości funkcji celu. Wartość parametru β_0 we wstępnej analizie wrażliwości wyniosła $\beta_0=53,13$.

3.3. Obliczenia optymalizacyjne

Zadaniem układów sterowania nadrzędnego i układów sterowania poszczególnych operacji przerobczych jest uzyskanie maksymalnej ilości produktów handlowych o zadanej jakości. Istotne znaczenie ma przy tym poprawny dobór konfiguracji układu technologicznego w zależności od charakterystyk nadawy i założeń produkcyjnych. Dla rozpatrywanego układu technologicznego z rys.1 zmiennymi decyzyjnymi są te same gęstości rozdziału jak w p.3.2. W tablicy 4 podane zostały zadane do obliczeń przedziały wartości dwóch parametrów jakościowych produktów handlowych.

Tabela 4

Zadane przedziały wartości parametrów jakościowych produktów handlowych

Nazwa produktu handlowego	Parametr jakościowy	Przedział wartości parametru jakościowego
<i>prod 1</i>	zawartość popiołu A_{prod1}	7,00- 8,00 %
<i>prod 2</i>	zawartość popiołu A_{prod2}	10,00-11,00 %

Założone dopuszczalne przedziały wartości zmiennych decyzyjnych algorytmu maksymalizacji produkcji przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5

Dopuszczalne przedziały wartości gęstości rozdziału w układzie technologicznym

Operacja przerobcza	Gęstość rozdziału	Dopuszczalny przedział wartości gęstości rozdziału
wzbogacanie w <i>HMS1</i>	δ_1	1,300-1,700 g/cm ³
wzbogacanie w <i>HMS2</i>	δ_2	1,500-1,900 g/cm ³
wzbogacanie w <i>HMS3</i>	δ_3	1,400-1,900 g/cm ³
wzbogacanie w hydrocyklonie z cieczą ciężką <i>HMC</i>	δ_4	1,500-1,900 g/cm ³

Wartość produkcji określona jest zależnością (6), a funkcja celu algorytmu maksymalizacji produkcji określona jest zależnością:

$$F_{mp}(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4) = \sum_{k=1}^3 \Gamma s_k(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4) * C_{jk} - \Gamma o(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4) * K_{so} - K_{pc} - K_{jc}, \quad (8)$$

gdzie: K_{pc} – funkcja kary za przekroczenie dopuszczalnych przedziałów wartości zmiennych decyzyjnych podanych w tab. 5,

K_{jc} – funkcja kary za przekroczenie dopuszczalnych przedziałów wartości parametrów jakościowych podanych w tab. 4.

Efektorem przeprowadzonych obliczeń są wyznaczone optymalne wartości zmiennych decyzyjnych algorytmu maksymalizacji produkcji podane w tabeli 6.

Tabela 6

Optymalne wartości gęstości rozdziału

Gęstość rozdziału	Optymalna wartość parametru rozdziału
δ_1	1,588 g/cm ³
δ_2	1,765 g/cm ³
δ_3	1,864 g/cm ³
δ_4	1,690 g/cm ³

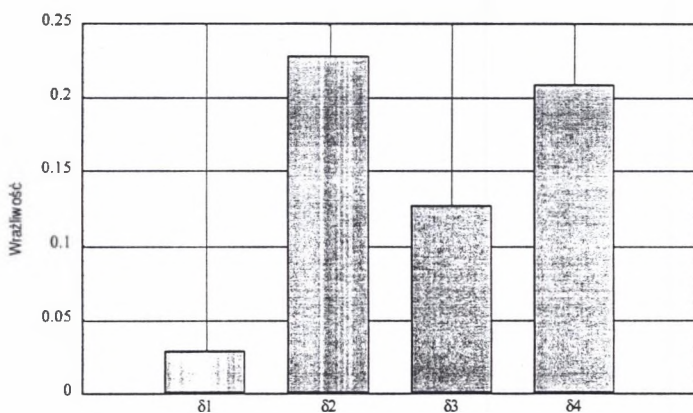
3.4. Analiza wrażliwości w otoczeniu optymalnego punktu pracy układu

Jako optymalny punkt pracy układu przyjęto wyznaczone w punkcie 3.3 wartości gęstości rozdziału (tab.6). Sprawdzającą analizę wrażliwości przeprowadzono w otoczeniu optymalnego punktu pracy układu dla dwóch przypadków zmian parametrów sterujących:

a) zmian co 0,05 g/cm³

W przedziałach:

$\delta_1 = 1,49-1,69$ g/cm³, $\delta_2 = 1,67-1,87$ g/cm³, $\delta_3 = 1,76-1,96$ g/cm³, $\delta_4 = 1,59-1,79$ g/cm³.

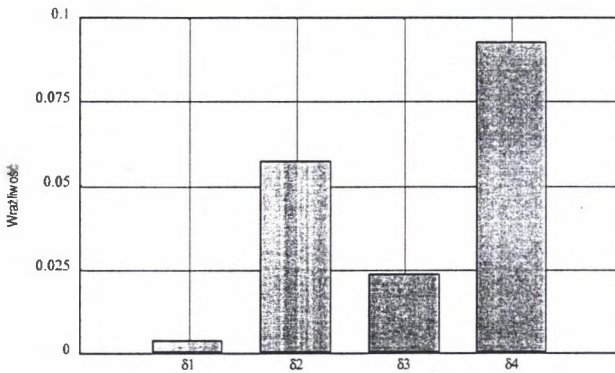


Rys.3. Wpływ zmiennych decyzyjnych (gęstości rozdziału) na funkcję celu
Fig. 3. Decision variables influence (separation density) on the objective function

b) zmian co 0,02 g/cm³

W przedziałach:

$\delta_1 = 1,55-1,63$ g/cm³, $\delta_2 = 1,73-1,81$ g/cm³, $\delta_3 = 1,82-1,90$ g/cm³, $\delta_4 = 1,65-1,73$ g/cm³.



Rys.4. Wpływ zmiennych decyzyjnych (gęstości rozdziału) na funkcję celu
 Fig. 4. Decision variables influence (separation density) on the objective function

W wąskim obszarze otaczającym maksimum wpływ zmiennych sterujących na funkcję celu zmienia się. Największy wpływ na wartość produkcji w otoczeniu optymalnego punktu pracy ma zmienna δ_4 (rys.4). Zmniejsza się natomiast wpływ zmiennej δ_3 (rys.3 i rys.4). Należy jednak zauważyć, że wartości liczbowe wrażliwości poszczególnych zmiennych sterujących w otoczeniu optimum są bardzo małe. Oznacza to, że zmiany gęstości rozdziału w otoczeniu optymalnego punktu pracy nie wpływają znacząco na zmiany wybranej funkcji celu.

Wartość średnia (parametr β_0) w analizie wrażliwości dla szerszego zakresu zmian w otoczeniu optymalnego punktu pracy wyniosła $\beta_0=55,46$, natomiast w analizie dla węższego zakresu $\beta_0=55,65$. Porównując te wartości z wartością β_0 wyznaczoną dla wstępnej analizy wrażliwości ($\beta_0=53,13$) można zauważyć, że parametr β_0 ma największą wartość w otoczeniu optimum. Wydaje się więc, że parametr β_0 może być dodatkowym wskaźnikiem umożliwiającym sprawdzenie poprawności otrzymanych wyników.

4. Wnioski

1. Przedstawiony przykład potwierdza możliwość określenia na podstawie analizy wrażliwości tych zmiennych sterujących, które mają decydujący wpływ na wybraną funkcję celu. Tym samym analiza wrażliwości umożliwia ustalenie struktury sterowania złożonego procesu przerobczego.
2. Wstępna analiza wrażliwości, określając wpływ poszczególnych zmiennych sterujących, umożliwia właściwy dobór kolejności zmiennych decyzyjnych w algorytmie maksymalizacji funkcji celu. Uzyskuje się dzięki temu skrócenie czasu poszukiwań maksimum globalnej funkcji celu.
3. Proponowana metoda poszukiwania optymalnej struktury sterowania, wykorzystująca analizę wrażliwości, ma tę zaletę, że nie jest potrzebna znajomość analitycznej zależności pomiędzy zmiennymi sterującymi a funkcją celu.

4. W złożonych układach technologicznych możliwe jest wyznaczenie optymalnych wartości parametrów rozdziału, co pozwala na uzyskanie maksymalnej wartości produkcji o zadanej jakości. Zaproponowana metoda może być przydatna przy projektowaniu układów sterowania maksymalizujących wartość produkcji zakładu przeróbki węgla.
5. Symulacja wydaje się być podstawową metodą, za pomocą której otrzymuje się informacje o złożonych układach technologicznych, w tym także o elastyczności układów przemysłowych.

LITERATURA

1. Blaschke W., Mokrzycki E., Blaschke S., Grudziński Z.: Rola formuł sprzedażnych węgla kamiennego, cenników w warunkach "wolnych" cen na węgiel. Przegląd Górniczy, 1991, t.47, nr 2, s.15-18
2. Cierpisz S., Pielot J.: Analiza procesów przeróbki mechanicznej węgla z zastosowaniem symulacji komputerowej. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1996, nr 12 (317), s.24-32
3. Homma T., Saltelli A.: Importance measures in global sensitivity analysis of model output. Reliability Engineering and System Safety, 52 pp.1-17, 1996
4. Kalinowski K., Kaula R.: Tworzenie struktury sterowania układów technologicznych procesów przeróbki kopalin poprzez badania wrażliwości zmiennych sterujących. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z.238, Gliwice 1998
5. Kleijnen J: Sensitivity Analysis and Related Analyses: a Survey of Statistical Techniques. International Symposium Theory and applications of Sensitivity analysis of Model Output in computer simulation. Belgirate, Italy, IX 1995
6. Pielot J.: Maksymalizacja produkcji w sterowaniu procesów przeróbki mechanicznej węgla z zastosowaniem komputerowego modelu symulacyjnego. Praca doktorska (niepublikowana), Gliwice 1998, Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej, 1998

Recenzent: Dr hab.inż. Anna Walaszek-Babiszewska
Prof. Politechniki Zielonogórskiej

Abstract

In the paper the example of optimal control structure determining of complex technological system of coal preparation plant has been presented. A methodology consisted in connection a sensitivity analysis with calculating of a maximum objective function (maximum of an output value with a given quality). For a given complex technological system the next analysis steps have been carried out: the initial sensitivity analysis, calculating of the maximum objective function, a checking sensitivity analysis.