

Roman KAULA
Politechnika Śląska, Gliwice

ANALIZA WRAŻLIWOŚCI UKŁADU WIELOWYMIAROWEGO NA PRZYKŁADZIE PROCESU FLOTACJI WĘGLA

Streszczenie. W referacie przedstawiono możliwość zastosowania analizy wrażliwości do określania wpływu wielkości wejściowych na wyjście obiektu sterowania w trakcie eksploatacji przemysłowego układu technologicznego. Analizę przeprowadzono dla układu technologicznego procesu flotacji węgla na podstawie pomiarów on-line otrzymanych w jednym z zakładów przeróbki kopalin.

SENSITIVITY ANALYSIS OF A MULTIVARIABLE SYSTEM BASED ON THE EXAMPLE OF THE COAL FLOTATION PROCESS

Summary. This paper presents the uses of a sensitivity analysis to determine a dependence of input variables on a controlled system output. The analysis of a multivariable system based on the measurement from the coal flotation process has been carried out.

1. Wstęp

Proces flotacji węgla z punktu widzenia sterowania jest złożonym wielowymiarowym obiektem. Na wielkości wyjściowe procesu flotacji (zawartości popiołu w koncentracie i odpadach – odpowiednio A_k , A_o) wpływ ma wiele zmiennych wejściowych. Podstawowymi wielkościami wejściowymi w procesie flotacji węgla są: koncentracja części stałych w nadawie (C_n), natężenie dopływu nadawy (V_n), zawartość popiołu w nadawie (A_n), natężenie odczynnika flotacyjnego V_o , natężenie dopływu powietrza do aeracji (V_p), poziom zawiesiny w komorach flotownika (h). Parametry nadawy (C_n , V_n , A_n) ze względu na ich duże fluktuacje są zakłóceniami procesu, natomiast pozostałe wielkości mogą być zmiennymi

sterującymi w procesie flotacji. W przypadku połączenia kilku flotowników liczba zmiennych sterujących w układzie technologicznym znacznie wzrasta.

Dlatego ważnym problemem występującym w zagadnieniach sterowania złożonym układem technologicznym jest ustalenie struktury sterowania. Przez strukturę sterowania rozumie się przyjęcie zbioru zmiennych sterujących mających decydujący wpływ na przyjętą funkcję celu. Liczba zmiennych sterujących powinna być możliwie mała, bowiem sterowanie układu o dużej liczbie zmiennych związane jest z trudnościami z identyfikacją procesu. Ograniczenia liczby zmiennych sterujących można dokonać w oparciu o analizę wrażliwości zmiennych ze względu na przyjętą funkcję celu sterowania [2, 3, 6]. Analiza wrażliwości może stanowić podstawę przy projektowaniu struktury sterowania. Pozwala na wybór takich zmiennych sterujących procesem technologicznym, które mają decydujący wpływ na funkcję celu. Wyznaczenie wrażliwości całkowitej w złożonych układach technologicznych metodami analitycznymi jest praktycznie niewykonalne. Analizę taką można przeprowadzić na podstawie znajomości modeli procesów przerobczych za pomocą techniki symulacji [4, 5].

Innym interesującym zagadnieniem, w którym można zastosować analizę wrażliwości, wydaje się być ocena wpływu poszczególnych wielkości wejściowych na wyjście obiektu w trakcie eksploatacji przemysłowego układu technologicznego. Analiza ta realizowana jest wtedy dla układu pracującego w określonym obszarze pracy w obecności zakłóceń przemysłowych.

W referacie przedstawiono analizę wrażliwości dla układu technologicznego procesu flotacji węgla zainstalowanego w zakładzie przeróbki kopalin KWK „Sośnica”. Obliczenia wykonano na podstawie pomiarów otrzymanych z bazy danych systemu monitoringu i sterowania tego układu [1].

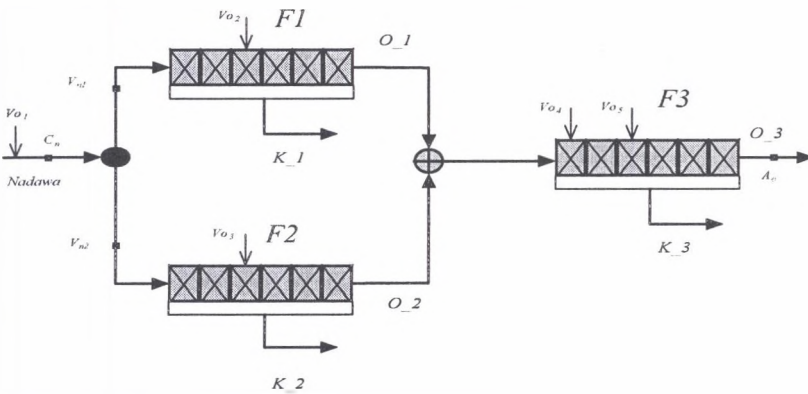
2. Układ technologiczny procesu flotacji węgla

Rozpatrywany wielowymiarowy obiekt sterowania składa się z trzech flotowników, w układzie (rys. 1), w którym dwa flotowniki pracują równolegle, natomiast trzeci flotownik połączony jest z nimi szeregowo. Odpady z flotowników równoległych wzbogacane są we flotowniku szeregowym.

W układzie tym w sposób ciągły mierzone są następujące wielkości:

- koncentracja części stałych w nadawie (C_n),

- natężenie przepływu nadawy (V_{n1} , V_{n2}),
- sumaryczne natężenie odczynnika flotacyjnego (V_o),
- natężenie przepływu powietrza do aeracji (V_{p1} , V_{p2} , V_{p3}),
- poziom zawiesiny w komorach flotownika (h_1 , h_2 , h_3),
- zawartość popiołu w odpadach flotownika szeregowego (A_o).

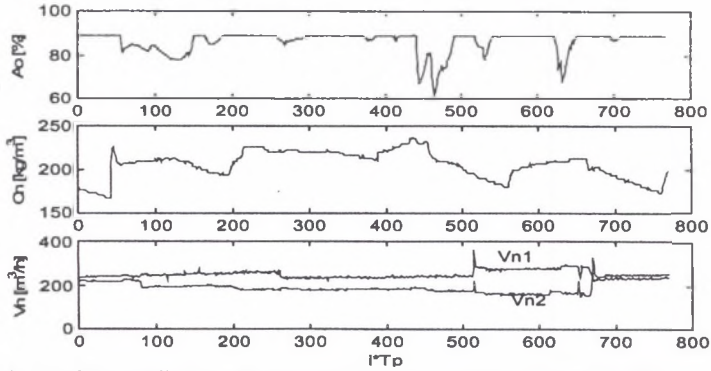


Rys. 1. Układ technologiczny flotacji
Fig. 1. Flowsheet of the flotation circuit

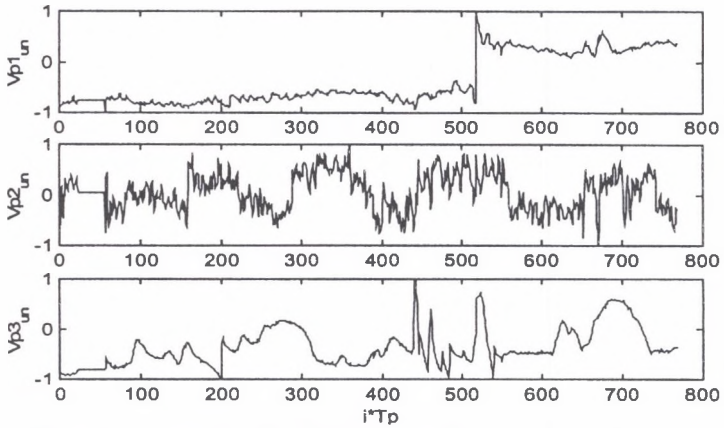
W analizowanym układzie odczynnik flotacyjny dozowany w jednakowych ilościach (20%) w pięciu punktach (V_{o1} - V_{o5}) - na czoło flotacji, do środkowych części komór flotowników równoległych oraz na czoło i komorę środkową flotownika szeregowego. Rejestrację przeprowadzano co $T_p = 60$ s, przy czym rejestrowane wartości poszczególnych wielkości pomiarowych były uśredniane z wartości chwilowych.

Analizę przeprowadzono dla danych (rys. 2-5). Przebiegi zawartości popiołu w odpadach oraz mierzonych parametrów nadawy przedstawiono na rys. 2. Pozostałe wielkości mierzone (rys. 3-5) przedstawiono w postaci unormowanej w przedziale $(-1 \div 1)$. Przy czym poszczególne wielkości wejściowe zmieniały się następująco:

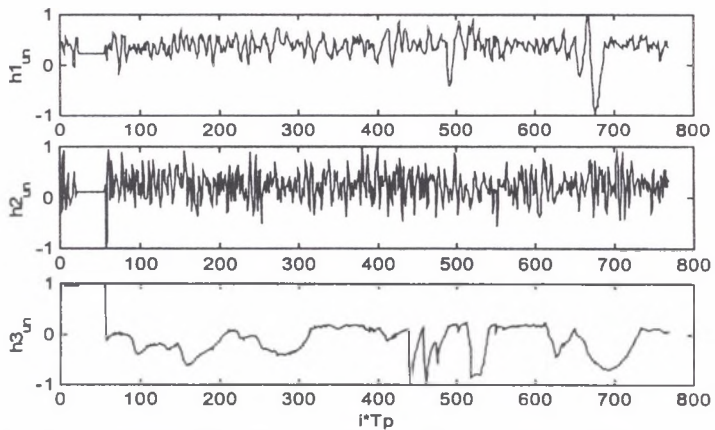
- natężenie odczynnika flotacyjnego V_o ($0 \div 7$) [g/l],
- natężenie dopływu powietrza V_{p1} , V_{p2} ($2200 \div 2900$) [m³/h],
- natężenie dopływu powietrza V_{p3} ($2200 \div 4000$) [m³/h],
- poziom zawiesiny w komorach flotowników h_1 , h_2 , h_3 ($-2 \div -9$) [cm].



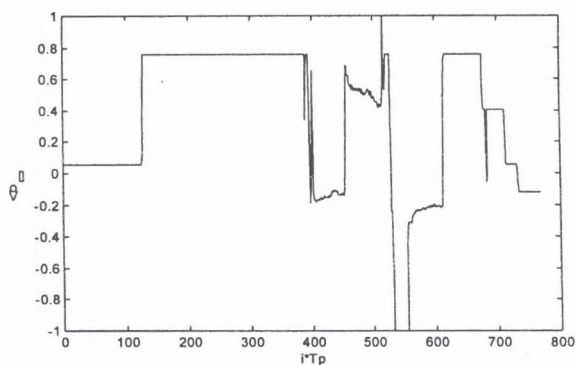
Rys. 2. Przebiegi wielkości wyjściowej (A_o) oraz parametrów nadawy (C_n , V_n)
 Fig. 2. Courses of the output variable (A_o) and feed parameters (C_n , V_n)



Rys. 3. Unormowane przebiegi natężenia dopływu powietrza do aeracji
 Fig. 3. Normalized courses of the air inflow intensity



Rys. 4. Unormowane przebiegi poziomu zawiesiny w komorach flotowników
 Fig. 4. Normalized courses of the flotation pulp level



Rys. 5. Unormowany przebieg natężenia odczynnika flotacyjnego
 Fig. 5. Normalized course of the flotation reagent intensity

3. Wyniki badań

Mając do dyspozycji przebiegi czasowe wielkości wejścia-wyjścia, otrzymane podczas eksploatacji układu, posiadamy ograniczone informacje dotyczące zakresu zmian poszczególnych zmiennych. Tym samym nie można określić modelu matematycznego uwzględniającego wpływ interakcji zmiennych na funkcję celu. Dlatego wpływ tych zmiennych na funkcję celu można wyznaczyć tylko dla określonego punktu (obszaru) pracy układu. Korzystamy wtedy z metody wyznaczenia wrażliwości cząstkowej. Metoda ta polega na wyznaczaniu pochodnej cząstkowej S_i , gdzie efekt wpływu zmiennej sterującej x_i na funkcję celu J wyraża się zależnością (1):

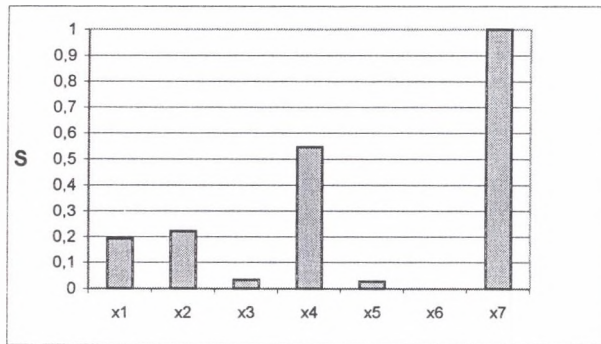
$$S_i = \frac{\partial J(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \quad (1)$$

Duży wpływ na funkcję celu J mają te zmienne sterujące procesem, dla których wrażliwość jest największa (bezwzględna wartość). Algorytm wyznaczania wrażliwości cząstkowej i całkowitej został omówiony w artykule [4].

3.1. Analiza wyników

Określenie funkcji celu oraz zmiennych sterujących w rozpatrywanej analizie wrażliwości jest związane z dostępnymi pomiarami ciągłymi wielkości wejścia-wyjścia procesu flotacji. Wielkością wyjściową (J) zatem wybrano zawartość popiołu w odpadach, natomiast zmiennymi sterującymi są: natężenie odczynnika flotacyjnego (x_1), natężenia

przepływu powietrza do aeracji (x_2, x_3, x_4) oraz poziom zawiesiny w komorach flotowników (x_5, x_6, x_7), odpowiednio dla poszczególnych flotowników. Wobec tego rozpatrywana funkcja celu zależy od siedmiu zmiennych sterujących. Uzyskane wartości wrażliwości cząstkowych przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wartości wrażliwości cząstkowej zmiennych sterujących na funkcję celu
Fig. 6. Partial sensitivity values of the control variables on the objective function

Największy wpływ na wybraną funkcję celu ma zmienna x_7 . Porównując przebiegi zawartości popiołu w odpadach oraz poziom zawiesiny w komorach flotownika 3 można zauważyć bardzo dużą zależność zmian poszczególnych wielkości. Parametry (V_{p3}, h_3) flotownika 3 mają dużo większy wpływ na funkcję celu niż parametry (V_{p1}, V_{p2}, h_1, h_2) flotowników równoległych. Interesujące są różnice wrażliwości dla parametrów flotowników połączonych równoległe (dla tej samej nadawy). Flotownik, z punktu widzenia dynamiki układu, jest obiektem o dużych stałych czasowych. Dlatego szybkie zmiany poszczególnych parametrów mogą wpływać na układ nie jako zmiana parametru sterującego, lecz jako zakłócenie (wartości tych zmiennych są filtrowane).

Potwierdza się istotny wpływ odczynnika flotacyjnego na zawartość popiołu w odpadach. Należy zauważyć, że nieproporcjonalne dozowanie odczynnika na poszczególne flotowniki umożliwiłoby uzyskanie pełniejszych informacji co do wpływu tej zmiennej na wielkości wyjściowe układu.

4. Wnioski

1. Dla jednoznacznej oceny wpływu natężenia odczynnika flotacyjnego na zawartość popiołu w odpadach (koncentracje) poszczególnych flotowników wymagane jest

- zainstalowanie czujników A_0 we wszystkich flotownikach. Potwierdza to celowość pełnego monitoringu procesu.
2. Przedstawione wyniki wskazują na możliwość zastosowania analizy wrażliwości do oceny wpływu poszczególnych wielkości wejściowych na wyjście procesu w określonym punkcie pracy w trakcie prowadzenia procesu.
 3. Wyniki uzyskane na podstawie takiej analizy mogą być wykorzystane do wstępnej oceny bieżącego stanu realizacji przyjętej strategii sterowania układu.

LITERATURA

1. Cierpisz S., Cierpisz T., Rotter S., Głowacki D., Pazur B., 2000: Systemy monitoringu i sterowania w zakładzie wzbogacania węgla i obiektach powierzchniowych KWK „Sośnica”. Materiały VI Konferencji „Automatyzacja Procesów Przeróbki Kopalni”, Szczyrk, s. 121-142.
2. Homma T., Saltelli A., 1996: Importance measures in global sensitivity analysis of model output. *Reliability Engineering and System Safety*, 52, s.1-17.
3. Kalinowski K., Kaula R., 1998: Tworzenie struktury sterowania układów technologicznych procesów przeróbki kopalni poprzez badania wrażliwości zmiennych sterujących. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo z.238*, Gliwice, s.437-445.
4. Kaula R., 2000: Zastosowanie analizy wrażliwości w zagadnieniach tworzenia struktur sterowania układu technologicznego na przykładzie układu technologicznego wzbogacania węgla. Materiały VI Konferencji „Automatyzacja Procesów Przeróbki Kopalni”, Szczyrk, s. 231-240.
5. Kaula R., Pielot J., 2001: Wykorzystanie analizy wrażliwości do optymalnego sterowania procesów przeróbki węgla. Materiały VII Konferencji „Automatyzacja Procesów Przeróbki Kopalni”, Kudowa Zdrój, s. 117-126.
6. Kleijnen J., 1995: *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.

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

Abstract

This paper presents the use of a sensitivity analysis to determine a dependence of input variables on a controlled system output. The analysis of a multivariable system based on the measurement from the coal flotation process has been carried out. The analysed flotation

circuit is a connection of three flotation banks in the configuration of the two first ones connected in parallel and the last one connected in series. The tailings from the parallel flotation banks are enriched in the series flotation bank. As the objective function tailings ash content from the series flotation bank has been accepted. It depends on seven control variables. The changes of the input variables are limited in the operating plant. In this reason a partial sensitivity analysis has been used. Obtained results based on proposed analysis can be applied to initial assessment of the realization state of the accepted control strategy.