

Jarosław JOOSTBERENS
Politechnika Śląska, Gliwice

WYNIKI BADAŃ IDENTYFIKACYJNYCH PROCESU FLOTACJI WĘGLA

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań identyfikacyjnych przeprowadzonych na obiekcie przemysłowym procesu flotacji węgla. Celem badań identyfikacyjnych było wyznaczenie charakterystyk statycznych i dynamicznych procesu flotacji opisujących wpływ natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego na ilość (wychód) koncentratu oraz na zawartość popiołu w koncentracie i odpadach flotacyjnych. Charakterystyki procesu flotacji wyznaczono w oparciu o laboratoryjne oznaczenie zawartości popiołu próbek pobieranych z nadawy, koncentratu i odpadów.

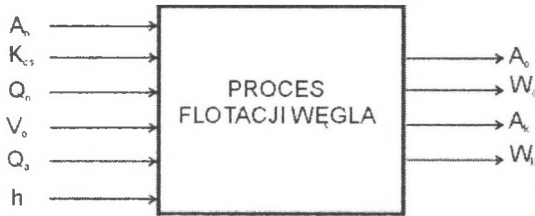
RESULTS OF IDENTIFICATION OF COAL FLOTATION PROCESS

Summary. The results of identification tests of the flotation process performed in the coal preparation plant are presented in this paper. The identification tests have been done to determine static and dynamic characteristics of coal flotation. The characteristics describe the empirical relations between input signal that is reagent flow rate and the yield of concentrate, the ash content of concentrate, the ash content in tailings. Some laboratory tests on samples have been performed to determine ash content in the feed and products of flotation.

1. Wprowadzenie

Flotacja należy do fizykochemicznych metod wzbogacania surowców mineralnych. W przypadku węgla kamiennych wzbogacanie tą metodą stosowane jest dla nadawy składającej się z ziaren mniejszych od 0,5 [mm] (max <1 [mm]). Z punktu widzenia automatyzowania procesu, flotacja węgla jest wielowymiarowym, dynamicznym nieliniowym obiektem sterowania [2,5]. Podstawowymi wielkościami wejściowymi procesu są: natężenie przepływu nadawy – Q_n o zawartości popiołu A_n i koncentracji części stałych w nadawie K_{cs} , natężenie przepływu odczynnika flotacyjnego V_o , natężenie przepływu powietrza do aeracji mętów Q_a oraz poziom zawiesiny w komorach flotownika h . Wielkościami wyjściowymi są:

ilość (wychód) koncentratu W_k , zawartość popiołu w koncentracie A_k , ilość (wychód) odpadów W_o , zawartość popiołu w odpadach A_o – rys. 1.



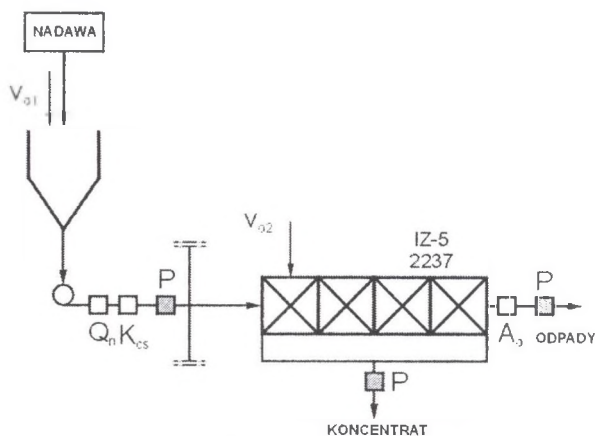
Rys. 1. Podstawowe wielkości wejściowe i wyjściowe procesu flotacji węgla
Fig. 1. Basic input – output signals in coal flotation process

Z punktu widzenia sterowania procesem flotacji natężenie przepływu odczynnika flotacyjnego jest głównym sygnałem sterującym. Celem przeprowadzonych badań identyfikacyjnych było określenie charakterystyk statycznych i dynamicznych opisujących zależności parametrów ilościowo-jakościowych koncentratu oraz parametru jakościowego odpadów od natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego.

2. Metodyka badań

2.1. Warunki badań

Badania identyfikacyjne zostały przeprowadzone na obiekcie flotacji KWK Jas–Mos [1]. Do realizacji eksperymentu wydzielony został flotownik typu IZ-5. Odczynnik flotacyjny był dozowany w dwóch miejscach: na czoło flotownika, będącego obiektem badawczym (V_{o2}) oraz do nadawy kierowanej do wszystkich flotowników zainstalowanych w zakładzie (V_{o1}). Konieczność dozowania minimalnej ilości odczynnika flotacyjnego do nadawy wynikała z prowadzenia normalnego procesu produkcyjnego i wartość ta nie była zmieniana w czasie prowadzonego eksperymentu. Natomiast dozowanie odczynnika flotacyjnego, związane z prowadzonym doświadczeniem identyfikacyjnym, odbywało się na czoło badanego flotownika (V_{o2}) – rys. 2.



Rys. 2. Układ technologiczny obiektu flotacji węgla. P – Miejsca próbowania
 Fig. 2. Flowsheet of coal flotation. P – Places of sampling

Poziom zawiesiny w komorze flotownika oraz natężenie przepływu powietrza do aeracji mętów nie podlegały kontroli za pomocą urządzeń pomiarowych, ale podczas eksperymentu ich wartości nie były zmieniane. Ponadto obserwowano wskazania przepływomierza i gęstościomierza nadawy oraz popiołomierza odpadów w celu kontroli poprawności prowadzonego doświadczenia pomiarowego, przy czym przepływomierz wskazywał natężenie przepływu nadawy kierowanej do wszystkich flotowników.

Badania wykonano, pobierając próbki z nadawy, koncentratu i odpadów flotacyjnych. Analiza laboratoryjna próbek została wykonana w laboratorium kopalni celem oznaczenia zawartości popiołu.

2.2. Charakterystyki statyczne

Identyfikacja charakterystyk statycznych $A_k = f(V_o)$, $A_o = f(V_o)$ wymagała:

- zebrania danych eksperymentalnych,
- obliczenia modelu danej zależności statycznej.

Realizacja pierwszej części zadania identyfikacyjnego polegała na pobraniu próbek z poszczególnych strug dla różnych wartości natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego w celu określenia zawartości popiołu w nadawie, koncentracie i odpadach flotacyjnych. Na podstawie uzyskanych danych empirycznych dokonano aproksymacji poszukiwanych zależności statycznych. Estymację parametrów szukanych modeli (modele wielomianowe) przeprowadzono Metodą Najmniejszych Kwadratów [6, 7, 9].

Ilość (wychód) koncentratu przyjmuje się najczęściej jako miarę flotowalności mułu [8]. Na podstawie równań bilansu mas i zawartości popiołów w nadawie i produktach flotacji ilość koncentratu może być obliczona z równania (1).

$$W_{k\%} = \frac{A_n - A_o}{A_k - A_o} \cdot 100 \quad (1)$$

gdzie:

$W_{k\%}$ – ilość (wychód) koncentratu [%].

Jak widać, równanie to wiąże ilość koncentratu z parametrami jakościowymi: nadawy i produktów flotacji. W związku z tym do oszacowania zależności $W_{k\%} = f(V_o)$ wystarcza pobranie próbek z nadawy, koncentratu i odpadów dla różnych wartości natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego. Po oznaczeniu zawartości popiołu poszczególnych próbek dokonano obliczenia ilości koncentratu zgodnie ze wzorem (1). Warunkiem poprawności obliczenia ilości koncentratu jest konieczność pobierania próbek w stanie ustalonym oraz przy stałości parametrów nadawy podczas całego doświadczenia identyfikacyjnego ($A_n = \text{const}$, $Q_n = \text{const}$, $K_{cs} = \text{const}$). Wartości poszczególnych parametrów nadawy podczas doświadczenia identyfikacyjnego wyniosły: $(A_n \pm \Delta A_n) = (11 \pm 1)\%$, $(K_{cs} \pm \Delta K_{cs}) = (109,3 \pm 2,5)$ g/l, $(Q_n \pm \Delta Q_n) = (524 \pm 3)$ m³/h.

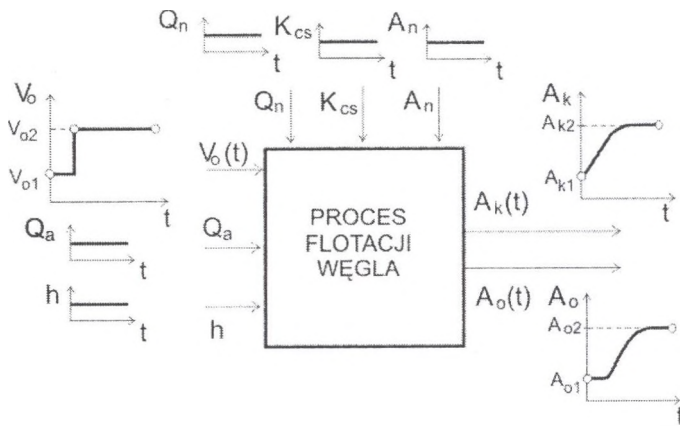
2.3. Pomiar własności dynamicznych procesu flotacji węgla

Identyfikacja modeli dynamicznych zmierzała głównie do określenia, jakimi modelami wystarczająco dokładnie można opisać własności dynamiczne badanego obiektu flotacji. W eksperymencie przemysłowym zastosowano metodę odpowiedzi skokowej, która najczęściej daje dostateczną dokładność bez konieczności przeprowadzania długich analiz [6]. Metody identyfikacji dynamiki obiektów oparte na pomiarze charakterystyki skokowej należą do najprostszych, ale wymagają arbitralnego przyjęcia typu modelu dynamiki [10]. W przypadku stosowania tej metody do identyfikacji własności dynamicznych procesu flotacji węgla dokonuje się linearyzacji przy przechodzeniu obiektu z jednego punktu pracy do drugiego na skutek skokowej zmiany sygnału wejściowego.

Na realizację zadania identyfikacyjnego składa się:

- zebranie danych eksperymentalnych będących wynikami pobudzenia obiektu przemysłowego wymuszeniem skokowym,
- obliczenie parametrów równania różnicowego (2) dla danych empirycznych.

W warunkach stałości parametrów nadawy zmiana natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego skutkuje zmianą parametrów ilościowo-jakościowych koncentratu i odpadów flotacyjnych. W celu wykonania pomiarów metodą odpowiedzi skokowej ustawiono wszystkie sygnały wejściowe procesu flotacji na poziomach odpowiadających danemu punktowi pracy, a następnie po wystąpieniu stanu ustalonego, zmieniono skokowo natężenie przepływu odczynnika flotacyjnego i w określonych odstępach czasu (okres próbkowania) pobierano próbki z koncentratu, odpadów i nadawy (rys. 3).



Rys. 3. Identyfikacja modeli dynamicznych procesu flotacji węgla metodą odpowiedzi skokowej
Fig. 3. Identification of dynamic models of coal flotation process using the step response method

Na podstawie uzyskanych wyników dokonano obliczenia parametrów równań różnicowych o postaci (2) dla obiektu o wejściu V_o i wyjściach odpowiednio: A_k i A_o .

$$Y(k) = -\sum_{i=1}^n a_i \cdot Y(k-i) + \sum_{j=1}^m b_j \cdot U(k-j) \quad (2)$$

gdzie:

$U(k-j)$ – skokowa zmiana ilości odczynnika flotacyjnego $U(k-j) = u(k-j) - u(0)$,

$Y(k-i)$ – zmiana sygnału wyjściowego $Y(k-i) = y(k-i) - y(0)$,

$y(0), u(0)$ – wartości początkowe sygnałów odpowiednio: wyjściowego i wejściowego w chwili $t(0)^{(-)}$ (przed rozpoczęciem doświadczenia identyfikacyjnego),
 $k=1, 2, \dots, t/T_s, T_s$ – okres próbkowania, t – czas.

2.4. Weryfikacja modeli

Jako kryterium oceny dopasowania modelu do danych eksperymentalnych przyjęto analizę wartości wariancji resztkowej [7,9]. Im mniejsza wartość wariancji resztkowej, tym lepsze jest dopasowanie modelu do danych empirycznych.

3. Wyniki badań identyfikacyjnych

Wyniki badań identyfikacyjnych zestawiono w tabeli 1 oraz przedstawiono graficznie na rysunkach 4 i 5.

Wyniki badań identyfikacyjnych procesu flotacji węgla

Tabela 1

Charakterystyki statyczne							
Lp.	Zależność	Parametry wielomianu drugiego stopnia			Stopień wielomianu wariancja resztkowa		
		g_0	g_1	g_2	1	2	3
1.	$A_k=f(V_o)$	d_0	d_1	d_2	1	2	3
		5,07	8,21	-10,10	0,247	0,129	0,155
2.	$A_o=f(V_o)$	d_0	d_1	d_2	1	2	3
		65,03	84,79	-107,70	19,18	3,55	4,20
Modele dynamiczne							
Lp.	Sygnał wyjściowy	T_s [s]	Parametry rów. różnicowego		Parametry modelu ciągłego		Wariancja resztkowa (model I rzędu)
			a_1	b_j	T [s]	τ [s]	
1.	A_k	360	-0,06	1,71	128	0	0,1
2.	A_o	360	-0,33	39,7	327	360	1,4

Uzyskane rezultaty badań identyfikacyjnych pokazują, że charakterystyki statyczne $A_k=f(V_o)$ oraz $A_o=f(V_o)$ dostatecznie dokładnie można opisać równaniami wielomianowymi drugiego stopnia (tabela 1).

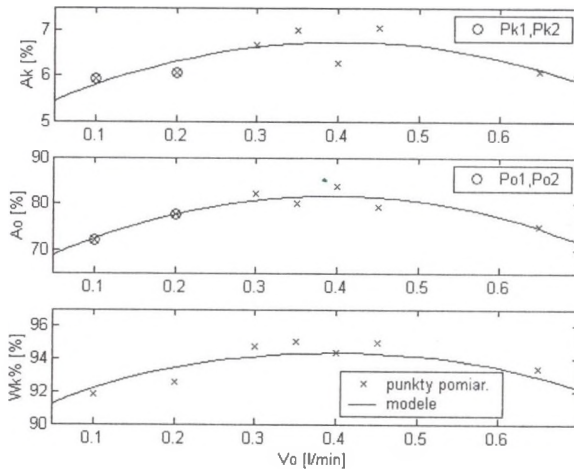
$$A_k = g_0 + g_1 \cdot V_o + g_2 \cdot V_o^2 \quad (3)$$

$$A_o = d_0 + d_1 \cdot V_o + d_2 \cdot V_o^2 \quad (4)$$

Podstawiając powyższe równania (3) i (4) do wzoru (1) w miejsce A_k , A_o , uzyskuje się równanie opisujące zależność statyczną $W_{k\%}=f(V_o)$ przy $A_n=\text{const}$, $Q_n=\text{const}$, $K_{cs}=\text{const}$.

$$W_{k\%} = \frac{(A_n - A_o)}{(A_k - A_o)} \cdot 100 = \frac{(A_n - (d_0 + d_1 V_o + d_2 V_o^2))}{((g_0 + g_1 V_o + g_2 V_o^2) - (d_0 + d_1 V_o + d_2 V_o^2))} \cdot 100 \quad (5)$$

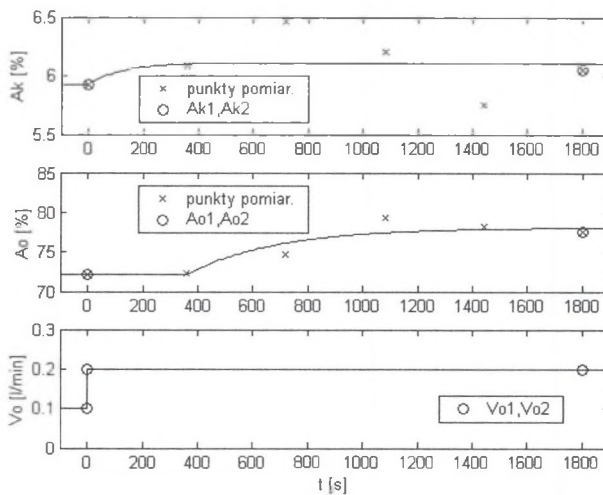
Charakterystykę statyczną opisaną zależnością (5) przedstawiono na rys. 4. Zamieszczono tam również ilości koncentraru obliczone w oparciu o zawartości popiołu próbek pobieranych z nadawy i produktów flotacji przy różnych wartościach natężenia odczynnika flotacyjnego. Należy stwierdzić, że obliczana ilość koncentraru w oparciu o zależność (5) wykazuje dobre dopasowanie do danych empirycznych.



Rys. 4. Charakterystyki statyczne procesu flotacji węgla
Fig. 4. Static characteristics of coal flotation process

Wyniki identyfikacji parametrów modeli dynamicznych zestawiono również w tabeli 1, a przykładowe przebiegi przedstawiono graficznie na rysunku 5.

Doświadczenie identyfikacyjne zostało przeprowadzone dla pojedynczej skokowej zmiany natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego. Efekt tej zmiany (w stanie ustalonym) został zaznaczony na poszczególnych charakterystykach statycznych (rys. 4). Jak widać na tym rysunku, zwiększenie V_o spowodowało wzrost odpowiednio: zawartości popiołu w koncentracie oraz zawartości popiołu w odpadach. Zmiany te obrazują na wykresie $A_k=f(V_o)$ punkty $Pk1(Vo1,Ak1) \rightarrow Pk2(Vo2,Ak2)$ oraz dla zależności $A_o=f(V_o)$ punkty $Po1(Vo1,Ao1) \rightarrow Po2(Vo2,Ao2)$.



Rys.5. Odpowiedzi zawartości popiołu w koncentracie i odpadach na skokową zmianę natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego

Fig. 5. Responses of ash content in concentrate and tailings to step change of amount of flotation reagent

Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że własności dynamiczne procesu flotacji o jednym wejściu sterującym (V_o) i wyjściu w postaci A_k można przedstawić modelem o strukturze elementu inercyjnego pierwszego rzędu. Pobudzenie obiektu skokowym zwiększeniem natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego podczas doświadczenia pomiarowego skutkowało niewielkim wzrostem zawartości popiołu w koncentracie (rys. 5). Uwzględniając przy tym ograniczoną liczbę danych pomiarowych (wynikającą ze znacznego okresu próbkowania), należy stwierdzić, że wnioskowanie dotyczące ilościowej oceny modelu jest niejednoznaczne, gdyż wymienione czynniki mają duży wpływ na dokładność estymowanych parametrów modelu o postaci (2). Ponadto uzyskane rezultaty nie rozstrzygają braku występowania opóźnienia w przypadku przebiegu zawartości popiołu w koncentracie.

W rzeczywistości opóźnienie transportowe może występować, ale ograniczenia metody pomiarowej (związane z próbobraniem) uniemożliwiły jego wykrycie i ilościową ocenę.

Wyniki badań pokazują, że własności dynamiczne procesu flotacji jako obiektu o wejściu V_o i wyjściu A_o przedstawić można w postaci modelu o strukturze elementu inercyjnego pierwszego rzędu z czasem opóźnienia [2,3,4]. Jak widać na rysunku 5, rezultaty przeprowadzonego doświadczenia identyfikacyjnego potwierdzają sformułowany wniosek, gdyż modelem dobrze dopasowanym do prezentowanych danych empirycznych jest model o strukturze elementu inercyjnego pierwszego rzędu z czasem opóźnienia.

4. Podsumowanie

Na podstawie analizy wyników badań identyfikacyjnych można stwierdzić, że charakterystyki statyczne opisujące wpływ natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego na zawartość popiołu w koncentracie oraz odpadach dostatecznie dokładnie opisać można wielomianami drugiego stopnia. Zauważyć należy, że zależność statyczna ilości koncentratu od natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego, obliczona na podstawie parametrów jakościowych nadawy, koncentratu i odpadów, ma również charakter ekstremalny.

Badania identyfikacyjne pokazują, że własności dynamiczne obiektu flotacji węgla o jednym wejściu sterującym (V_o) przedstawić można jako modele o strukturze: elementu inercyjnego pierwszego rzędu dla wyjścia A_k oraz elementu inercyjnego pierwszego rzędu z czasem opóźnienia dla wyjścia A_o .

BIBLIOGRAFIA

1. Cierpisz S., Gröbner Ł., Joostberens J.: Identyfikacja procesu flotacji węgla – badania przemysłowe. X Konferencja APPK, Szczyrk 2004, s. 63–69.
2. Cierpisz S., Joostberens J.: Simulation of fuzzy control of coal flotation. IFAC Workshop – MMM 2006. Automation in Mining, Mineral and Metal Industry. Cracow-Poland 2006, pp. 210–214.
3. Joostberens J.: Badania własności dynamicznych procesu flotacji węgla jako obiektu sterowania. VIII APPK, Szczyrk 2002, s. 103–112.
4. Joostberens J.: Zastosowanie sieci neuronowych do identyfikacji modeli dynamicznych procesu flotacji węgla. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2/445, 2008, s. 25–28.

5. Kalinowski K.: Sterowanie procesu flotacji węgla. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1991.
6. Larminat P., Thomas Y.: Identyfikacja, Automatyka – układy liniowe. T. 2, WNT, Warszawa 1983.
7. Niederliński A.: Systemy i sterowanie. Wyd. PWN, Warszawa 1983.
8. Sablik J.: Flotacja węgla kamiennych. Wyd. GIG, Katowice 1998.
9. Zapała W.: Wybrane zagadnienia komputerowej identyfikacji i sterowania w kopalniach. Seminarium Elektryfikacji i Automatykacji Kopalń. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1994.
10. Żuchowski A.: Wyznaczanie typu liniowego modelu dynamiki obiektu przy wykorzystaniu charakterystyki skokowej. Materiały XIV Krajowej Konferencji Automatyki, Zielona Góra 2002, str. 401–406.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Mokrzycki