



JAROSŁAW JOOSTBERENS\*

## Modelowanie koncentracji części stałych w nadawie do flotacji węgla kamiennego

### Wprowadzenie

W przypadku węgla kamiennych, wzbogacanie metodą flotacji stosowane jest dla nadawy składającej się z ziaren mniejszych od 0,5 mm ( $\max < 1$  mm). Flotacja należy do fizykochemicznych procesów wzbogacania. Jest ona procesem bardzo skomplikowanym i trudnym do sterowania. Nadawę do flotacji węgla charakteryzuje szereg parametrów, w tym koncentracja części stałych, natężenie przepływu oraz zawartość popiołu. W krajowych rozwiązaniach sterowania procesem flotacji węgla kamiennego z parametrów nadawy zwykle dostępne pomiarowo są: koncentracja części stałych oraz natężenie przepływu. Koncentracja części stałych podlega losowym zaburzeniom zmieniającej się nadawy i należy ją traktować jako zakłócenie w układzie automatycznego sterowania procesu flotacji. Zmiany koncentracji części stałych wpływają znacząco na efekt flotacji w postaci zmian wartości parametrów ilościowych oraz jakościowych produktów. W związku z tym, w systemach sterowania procesu flotacji, wielkość dawki odczynnika flotacyjnego uzależniona jest od aktualnej wartości parametrów ilościowych nadawy. Modelowanie koncentracji części stałych w nadawie, jako zakłócenia, ma istotne znaczenie przy pracach projektowych oraz badaniach symulacyjnych związanych z opracowaniem doskonalszych algorytmów sterowania przemysłowym procesem flotacji węgla. Zagadnienie modelowania parametrów nadawy do flotacji węgla nabiera szczególnego znaczenia w przypadku procesów przemy-

---

\* Dr inż., Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa, Politechnika Śląska, Gliwice;  
e-mail: jaroslaw.joostberens@polsl.pl

słowych, których nadawa z powodów technologicznych charakteryzuje się znacznymi wahaniami oraz dużymi wartościami koncentracji części stałych, a których zmniejszenie jest trudne do realizacji bez konieczności poniesienia dużych nakładów finansowych. Zakłócenie losowe w formie zmian w czasie koncentracji części stałych w nadawie można przedstawić w postaci procesu stochastycznego. Do opisu przebiegów czasowych koncentracji części stałych w nadawie do flotacji węgla można użyć modeli ARMA (Walaszek-Babiszewska i Zapała 1990). Modele te znajdują również zastosowanie w opisie strumienia materiałowego, będącego koncentratem końcowym z procesu flotacji rud (Trybalski 1996).

Modele ARMA mogą być użyte do prognozowania ciągów czasowych (Bielińska 2007). Prognozowanie wartości koncentracji części stałych w nadawie może być wykorzystywane w opracowywaniu układów automatycznego sterowania (sterowanie predykcyjne). W przypadku układów, w których stosuje się ręczne sterowanie procesu flotacji węgla, informacja o przyszłych wartościach koncentracji części stałych w nadawie może być użyteczna przy podejmowaniu decyzji przez operatorów – ekspertów procesu w zakresie zmian wartości nastaw sygnałów sterujących, takich jak dawka odczynnika flotacyjnego.

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń modelowych przeprowadzonych na postawie zarejestrowanych dyskretnych przebiegów czasowych koncentracji części stałych w nadawie, przy czym ich opisu dokonano za pomocą modeli ARMA.

## 1. Metoda estymacji parametrów modeli ARMA

W obliczeniach założono, że proces, obserwowany co okres próbkowania  $T_s$ , można opisać w postaci modelu o transmitancji:

$$y_t = \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} e_t \quad (1)$$

↪  $e_t$  – ciąg nieskorelowanych zakłóceń o wartości średniej równej zero i wariancji  $\sigma_e^2$ ,  
 $y_t$  – scentrowany ciąg zmierzonych wartości koncentracji części stałych w nadawie flotacyjnej o liczbie próbek  $N$ .

W modelu ARMA aktualna wartość procesu jest liniową kombinacją wyjść w chwilach przeszłych i odfiltrowanego białego szumu (Zimmer i Englot 2005). Identyfikacja modelu o równaniu (1) zmierza do wyznaczenia:

- ◆ rzędu modelu,
- ◆ parametrów modelu,
- ◆ wariancji szumu  $\sigma_e^2$ .

Do obliczenia wartości szukanych wielkości stosuje się algorytmy liniowej estymacji parametrów modeli ARMA (Mayne i Firoozan 1982; Zapała 1994). Estymację

parametrów modelu o równaniu (1) przeprowadzono dwustopniową metodą najmniejszych kwadratów. W metodzie tej w pierwszej kolejności dokonuje się wyznaczenia parametrów równania:

$$\varepsilon_t = B(z^{-1})y_t \quad (2)$$

↪  $\varepsilon_t$  – ciąg reszt,  
 $B(z^{-1}) = 1 + b_1 z^{-1} + \dots + b_p z^{-p}$ .

Wymaga to obliczenia takich parametrów  $b_1, b_2, \dots, b_p$  równania (2), dla których wyrażenie (3) osiąga wartość minimalną.

$$J_b = \sum_{t=p+1}^N (B(z^{-1}) \cdot y_t)^2 \quad (3)$$

Następnie dokonuje się filtracji danych zgodnie ze wzorem (2) celem wyznaczenia ciągu reszt  $\varepsilon_t$ , będącego przybliżeniem szukanego przebiegu białego szumu  $e_t$  z równania (1).

W drugim etapie dokonuje się wyznaczenia parametrów  $a_1, a_2, \dots, a_n$  oraz  $c_1, c_2, \dots, c_n$  modelu ARMA ( $n < p$ ) o równaniu (1), dla których minimum osiąga wyrażenie:

$$J_{ac} = \sum_{t=p+1}^N (A(z^{-1}) \cdot y_t - C(z^{-1}) \cdot \varepsilon_t)^2 \quad (4)$$

gdzie:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_n z^{-n}$$

Wszystkie pierwiastki wielomianu  $z^n A(z^{-1})$  powinny leżeć wewnątrz koła jednostkowego na płaszczyźnie zmiennej zespolonej. Natomiast wszystkie pierwiastki wielomianu  $z^n C(z^{-1})$  powinny leżeć wyłącznie wewnątrz lub wyłącznie na zewnątrz koła jednostkowego (Zapała 1994).

W celu wyznaczenia rzędu  $p$  procesu autoregresji (2) dokonano oceny wartości wariancji reszt  $\sigma_\varepsilon^2(p)$  oraz wskaźnika  $FPE(p)$ . Wariancję resztową wyraża wzór:

$$\sigma_\varepsilon^2(p) = \frac{1}{N-p} \sum_{t=p+1}^N (y_t + b_1 y_{t-1} + \dots + b_p y_{t-p})^2 \quad (5)$$

Wskaźnik  $FPE$  wyznacza się z zależności:

$$FPE(p) = \frac{N+p}{N-p} \cdot \sigma_{\varepsilon}^2(p) \quad (6)$$

Do doboru rzędu procesu autoregresji, reprezentującego poszukiwany proces ARMA, przyjęto kryterium (6). Za rząd modelu  $AR(p)$  należy przyjąć tę wartość  $p$ , dla której wyznaczone parametry  $b_1, b_2, \dots, b_p$  równania (2) minimalizują kryterium (6).

W celu oceny rzędu modelu ARMA o postaci (1) posłużono się wyrażeniem na wariancję resztową modelu opisaną równaniem:

$$\sigma_{\varepsilon}^2(n) = \frac{1}{N-n-1} \sum_{t=n+1} (\varepsilon_t)^2 \quad (7)$$

↪  $n$  – rząd modelu ARMA.

W równaniu (7) ciąg reszt wyrażony jest wzorem:

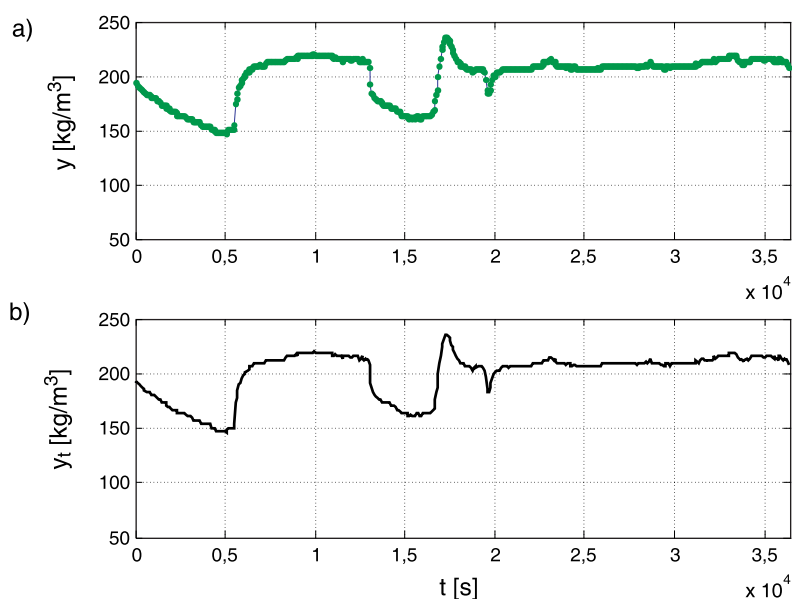
$$\varepsilon_t = y_t + a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + \dots + a_n y_{t-n} - c_1 \varepsilon_{t-1} - c_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - c_n \varepsilon_{t-n} \quad (8)$$

Dobór rzędu modelu ARMA ma charakter wielokryterialny. Za rząd modelu ARMA można przyjąć ten rząd  $n$  modelu (1), dla którego obliczonych parametrów  $a_1, a_2, \dots, a_n, c_1, c_2, \dots, c_n$  wartość kryterium (7) nie zmniejsza się znacząco w stosunku do modelu o rzędzie  $n+1$  i wyższych, tzn., że wartość wariancji resztowej modelu przestaje zmieniać się znacząco wraz ze wzrostem rzędu modelu. Ciąg reszt powinien posiadać właściwości zbliżone do właściwości białego szumu. W tym celu można badać funkcję autokorelacji ciągu reszt  $\varepsilon_t$  (Mańczak i Nahorski 1983; Zimmer i Englot 2005). Jest to jedno z kryteriów oceny rzędu szukanego opisu procesu zgodnego z równaniem (1) (Zapała 1994).

## 2. Wyniki obliczeń

Zadanie badawcze sprowadzono do identyfikacji modelu (1) opartej na trzech seriach pomiarowych o liczbie punktów odpowiednio 629, 419, 459, zarejestrowanych w trzech kolejnych okresach ciągłej (bez przerw) pracy flotowników. Rejestracja prowadzona była co okres próbkowania  $T_s = 60$  s, przez system sterowania i monitoringu przemysłowego obiektu flotacji złożonego z dwóch flotowników pierwotnych (flotacja wstępna) oraz jednego flotownika wtórnego (Cierpisz i in. 1999). Nadawa o wartościach koncentracji części stałych rejestrowanych przez system, kierowana była do flotowników pierwotnych, których odpady z kolei, stanowiły nadawę dla flotownika wtórnego. Nadawa do flotacji charakteryzowała się dużymi wartościami koncentracji części stałych oraz znaczną rozpiętością ich

wartości. W przypadku poszczególnych serii pomiarowych zakres obserwowanych zmian wyniósł odpowiednio: seria pierwsza – 146–236 kg/m<sup>3</sup>, seria druga – 177–235 kg/m<sup>3</sup>, seria trzecia – 186–262 kg/m<sup>3</sup>. W ramach obliczeń wyznaczono parametry modeli dla poszczególnych ciągów danych pomiarowych celem ich porównania. Stwierdzono, że dla dwóch serii pomiarowych rzędem modelu ciągu reszt najlepiej realizującym minimalizację kryterium (6) jest  $p = 4$ , a dla jednego ciągu danych pomiarowych wartość ta wyniosła  $p = 5$ . Przeprowadzono więc estymację parametrów modelu (1) od rzędu  $n = 1$  do  $n = p - 1$ , dla dwóch wartości rzędu modelu ciągu reszt:  $p = 4$  oraz  $p = 5$ , przy przyjęciu odpowiedniego punktu startowego. Realizację zadania identyfikacyjnego przeprowadzono dla pierwszej serii danych pomiarowych, natomiast dwie pozostałe serie wykorzystano do weryfikacji obliczonych modeli. Zbadano funkcję autokorelacji ciągu reszt modelu procesu ARMA. Wyznaczono zera i bieguny transmitancji (1) dla uzyskanych parametrów. Stwierdzono, że w odniesieniu do przyjętych modeli spełnione są wymagania podane w pkt. 2. Wyniki przeprowadzonych obliczeń identyfikacyjnych stabelaryzowano (tab. 1). Przykładowy przebieg koncentracji części stałych w nadawie przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg czasowy koncentracji części stałych w nadawie  
a) dane pomiarowe – seria I, b) model ARMA

Fig. 1. Time series of solids concentration in the feed  
a) measurement data – series I, b) ARMA model

Przeprowadzone obliczenia oraz ocena ilościowa przyjętych kryteriów wskazują na słusność przyjęcia modelu ARMA rzędu trzeciego do opisu przebiegu koncentracji części stałych w nadawie do flotacji, wyznaczonego na podstawie ciągu reszt opisanego modelem

Tabela 1. Parametry modeli opisujących przebieg czasowy koncentracji części stałych w nadawie do procesu flotacji węgla wyznaczone dla pierwszej serii danych pomiarowych

Table 1. Parameters of models describing the time series of solids concentration in the feed for coal flotation process calculated for the first series of measurement data

Ciąg reszt	$p = 4$			$p = 5$			
	$b_1 = -1,4713, b_2 = 0,4719, b_3 = -0,1447, b_4 = 0,1519$			$b_1 = -1,4699, b_2 = 0,4704, b_3 = -0,1400, b_4 = 0,1381, b_5 = 0,0093$			
Model ARMA	$n$			$n$			
	1	2	3	1	2	3	4
$a_1$	-0,9933	-1,8034	-1,5853	-0,9933	-1,8084	-1,6129	-1,5027
$a_2$	–	0,8077	0,4885	–	0,8127	0,5279	0,5310
$a_3$	–	–	0,1031	–	–	0,0910	-0,1834
$a_4$	–	–	–	–	–	–	0,1628
$c_1$	0,4776	-0,3320	-0,1136	0,4762	-0,3383	-0,1425	-0,0328
$c_2$	–	-0,1529	-0,1511	–	-0,1553	-0,1527	0,0125
$c_3$	–	–	0,0791	–	–	0,0739	-0,0097
$c_4$	–	–	–	–	–	–	-0,0001

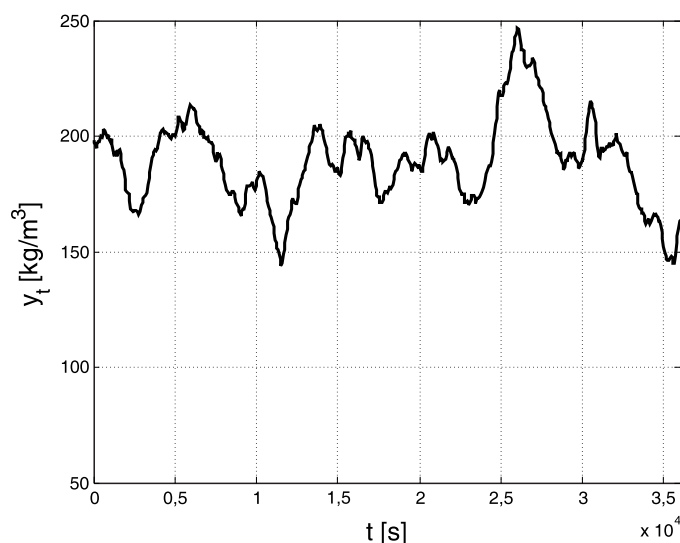
rzędu czwartego. Do opisu przebiegu czasowego koncentracji części stałych przyjęto model (1) o parametrach (tab. 1):

$$a_1 = -1,5853; \quad a_2 = 0,4885; \quad a_3 = 0,1031 \quad (9)$$

$$c_1 = -0,1136; \quad c_2 = -0,1511; \quad c_3 = 0,0791$$

Wykorzystując wyznaczony model ARMA o parametrach (9) zasymulowano 15 ciągów koncentracji części stałych w nadawie (każdy ciąg danych o długości 600 próbek i okresie próbkowania  $T_s = 60$  s), pobudzając model zmienną losową o rozkładzie normalnym i wartości średniej równej zero oraz wariancji  $\delta_e^2 = 2,53$ . Przykładowy symulowany przebieg koncentracji części stałych w nadawie przedstawiono na rysunku 2. Na podstawie uzyskanych ciągów danych przeprowadzono identyfikację wartości parametrów modeli (1) trzeciego rzędu. Następnie dokonano obliczenia wartości średnich parametrów tych modeli oraz odchyłeń standardowych względem wartości parametrów (9), estymowanych na podstawie danych przemysłowych. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiono w tabeli 2.

W kolejnym etapie dokonano obliczenia wartości parametrów modeli ARMA na podstawie danych przemysłowych drugiej i trzeciej serii pomiarowej oraz dokonano porównania ilościowego tych parametrów z parametrami (9). Wyniki obliczeń identyfikacyjnych modeli wyznaczonych dla danych pomiarowych zarejestrowanych w trzech kolejnych przedziałach



Rys. 2. Przykładowy symulowany przebieg koncentracji części stałych w nadawie

Fig. 2. Example of simulated time series of solids concentration in the feed

Tabela 2. Wartości średnie oraz odchylenia standardowe parametrów modeli wyznaczonych na podstawie symulowanych przebiegów koncentracji części stałych w nadawie flotacyjnej

Table 2. The mean values and standard deviation of model parameters determined on the basis of simulated time series of solids concentration in the flotation feed

L.p.	Parametry modelu	Wartość średnia		$\sigma_{ji}$
		$\bar{a}_i$	$\bar{c}_i$	
1.	$a_1 = -1,5853$	- 1,5989	–	0,11
2.	$a_2 = 0,4885$	0,5197	–	0,20
3.	$a_3 = 0,1031$	0,0877	–	0,10
4.	$c_1 = -0,1136$	–	- 0,1483	0,11
5.	$c_2 = -0,1511$	–	- 0,1332	0,07
6.	$c_3 = 0,0791$	–	0,0672	0,05

$$i = 1, 2, 3; j = a, c.$$

czasowych ciągłej pracy przemysłowego obiektu zestawiono w tabeli 3. Wartości parametrów obliczonych zastosowaną metodą mieszczą się w przedziale trzykrotnej wartości wyznaczonych odchylen standardowych. Można więc stwierdzić, że parametry modelu koncentracji części stałych w nadawie nie ulegają znaczącej zmianie w czasie trzech kolejnych okresów pracy obiektu flotacji.

Tabela 3. Wartości parametrów modeli wyznaczone dla trzech kolejnych serii danych pomiarowych

Table 3. Values of model parameters calculated for three successive series of measurement data

L.p.	Parametry modelu	Seria danych pomiarowych		
		I	II	III
1.	$a_1$	-1,5853	-1,6494	-1,7572
2.	$a_2$	0,4885	0,5952	0,7833
3.	$a_3$	0,1031	0,0600	-0,0207
4.	$c_1$	-0,1136	-0,1759	-0,2853
5.	$c_2$	-0,1511	-0,1420	-0,1090
6.	$c_3$	0,0791	0,0860	0,0993

Zgodnie z przyjętym modelem procesu, wartość koncentracji części stałych w nadawie w chwili czasu  $t$  opisuje równanie:

$$y_t = -a_1 y_{t-1} - a_2 y_{t-2} - a_3 y_{t-3} + e_t + c_1 e_{t-1} + c_2 e_{t-2} + c_3 e_{t-3} \quad (10)$$

Zatem w chwili czasu  $(t + 1)$  wartość sygnału wyraża wzór:

$$y_{t+1} = -a_1 y_t - a_2 y_{t-1} - a_3 y_{t-2} + e_{t+1} + c_1 e_t + c_2 e_{t-1} + c_3 e_{t-2} \quad (11)$$

Oznaczając jako wartość prognozy sygnału w chwili  $(t + 1)$ , ale wypracowanego w chwili  $t$ , oraz odejmując tę wartość od obu stron równania (11) otrzymuje się wyrażenie:

$$y_{t+1} - \hat{y}_{t+1|t} = (-a_1 y_t - a_2 y_{t-1} - a_3 y_{t-2} + c_1 e_t + c_2 e_{t-1} + c_3 e_{t-2} - \hat{y}_{t+1|t}) + e_{t+1} \quad (12)$$

Łatwo zauważyć, że równanie (12) jest równaniem błędu predykcji, zdefiniowanego jako różnica między wartością sygnału a jego prognozą (Bielińska i Figwer 1995). Wykorzystując równanie (12) można sformułować równanie predyktora ciągu czasowego koncentracji części stałych w nadawie w postaci:

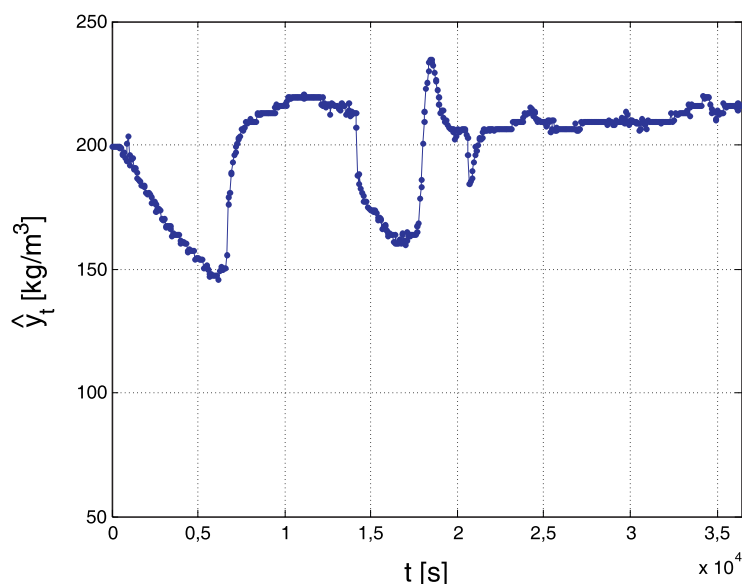
$$\hat{y}_{t|t-1} = -a_1 y_t - a_2 y_{t-1} - a_3 y_{t-2} + c_1 e_t + c_2 e_{t-1} + c_3 e_{t-2} \quad (13)$$

gdzie

$$e_t = y_t - \hat{y}_{t|t-1}$$

Równanie (13) umożliwia jednokrokowe prognozowanie wartości koncentracji części stałych w nadawie (z horyzontem predykcji równym okresowi próbkowania  $T_s$ ). Przebieg prognozy koncentracji części stałych w nadawie, wyznaczonej na podstawie równania (13),





Rys. 3. Prognoza koncentracji części stałej w nadawie wyznaczona dla pierwszej serii danych pomiarowych z horyzontem predykcji równym okresowi próbkowania

Fig. 3. Prediction of solid concentration in the feed calculated for the first series with the prediction horizon equal to the sampling period

dla przebiegu rzeczywistego jak na rysunku 1a, przedstawia rysunek 3. Na rysunku tym widać dużą zbieżność prognozy z danymi wejściowym, czyli zmierzonymi wartościami koncentracji części stałych w nadawie. Uprawnione jest więc stwierdzenie, że prognozowanie z horyzontem predykcji równym jednemu okresowi próbkowania opartemu na równaniu (13) daje zadowalające wyniki.

### Podsumowanie

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że przebieg czasowy koncentracji części stałych w nadawie można opisać w postaci procesu ARMA trzeciego rzędu, opartego na ciągu reszt opisanym modelem rzędu czwartego. Wyznaczone parametry modeli dla danych pomiarowych zarejestrowanych w trzech kolejnych okresach ciągłej pracy przemysłowego obiektu flotacji mieszczą się w wyznaczonym przedziale niepewności. To pokazuje, że wartości parametrów modelu w kolejnych trzech następujących po sobie okresach ciągłej pracy obiektu nie ulegają znaczącej zmianie. Estymowane parametry modelu ARMA można wykorzystać do prognozowania ciągu czasowego koncentracji części stałych w nadawie z horyzontem predykcji równym okresowi próbkowania.

## LITERATURA

- Bielińska, E. 2007. *Prognozowanie ciągów czasowych*. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej, 164 s.
- Bielińska, E. i Figwer, J. 1995. *Analiza, identyfikacja i predykcja ciągów czasowych*. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej, 134 s.
- Cierpisz i in. 1999 – Cierpisz, S., Cierpisz, T., Król, S., Joostberens, J. i Piwowar E. 1999. Automatyczna regulacja procesu flotacji węgla w Zakładzie Wzbogacania Węgla Kopalni „Sośnica”. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 7/346, s. 7–14.
- Mańczak, K. i Nahorski, Z. 1983. *Komputerowa identyfikacja obiektów dynamicznych*. Warszawa: Wyd. Nauk. PWN, 432 s.
- Mayne, D.Q. i Firoozan, F. 1982. Linear Identification of ARMA Processes. *Automatica* vol. 18, no. 4, s. 461–466.
- Trybalski, K. 1996. Dyskretne modelowanie procesów przeróbki kopalni. *Zeszyty Naukowe AGH, Seria Górnictwo* z. 4, s. 305–322.
- Walaszek-Babiszewska, A. i Zapła, W. 1990. Model zagęszczenia nadawy jako zakłócenia w układzie automatycznego sterowania procesu flotacji węgla. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo* z. 184, s. 135–142.
- Zapła, W. 1994. *Wybrane zagadnienia komputerowej identyfikacji i sterowania w kopalniach*. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej, 132 s.
- Zimmer, A. i Englot, A. 2005. *Identyfikacja obiektów i sygnałów*. Kraków, Wyd. Politechniki Krakowskiej, 239 s.

## MODELOWANIE KONCENTRACJI CZĘŚCI STAŁYCH W NADAWIE DO FLOTACJI WĘGLA KAMIENNEGO

### Słowa kluczowe

Proces flotacji węgla, identyfikacja, model, układ sterowania, predykcja

### Streszczenie

W polskich rozwiązaniach systemów sterowania i monitorowania procesu flotacji węgla kamiennego zwykle z parametrów nadawy tylko natężenie przepływu oraz koncentracja części stałych są mierzone w sposób ciągły. Z punktu widzenia sterowania procesu flotacji, wielkości te należy traktować jako zakłócenia, gdyż podlegają losowym zaburzeniom zmieniającej się nadawy. Losowe zmiany koncentracji części stałych w nadawie mogą w istotny sposób wpływać na parametry ilościowe i jakościowe produktów flotacji węgla. Z tego punktu widzenia opis mierzonej koncentracji części stałych w nadawie w postaci modelu matematycznego nabiera szczególnego znaczenia. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń identyfikacyjnych modelu koncentracji części stałych nadawy kierowanej do procesu flotacji węgla kamiennego jako zakłócenia. Dane pomiarowe niezbędne do wyznaczenia empirycznego modelu koncentracji części stałych w nadawie uzyskano z rejestracji prowadzonej w trzech następujących po sobie okresach pracy obiektu przemysłowego jednej z polskich kopalń. Pomiar koncentracji części stałych realizowany był z użyciem gęstościomierza izotopowego. Pierwsza seria danych pomiarowych wykorzystana została do wyznaczenia modelu koncentracji części stałych w nadawie, a dwie pozostałe serie danych pomiarowych wykorzystano do weryfikacji obliczonego modelu. Przebiegi czasowe koncentracji części stałych w nadawie opisano za pomocą modelu ARMA o postaci (1), a estymacji parametrów modeli dokonano dwustopniową metodą najmniejszych kwadratów. Wyniki identyfikacji i przeprowadzona weryfikacja wyznaczonego modelu wykazały słuszność przyjęcia modelu ARMA rzędu trzeciego o parametrach (9).

Parametry tego modelu ARMA wyznaczono opierając się na ciągu reszt opisanym modelem rzędu czwartego (tab. 1). Wyznaczony model koncentracji części stałych w nadawie do flotacji węgla jako zakłócenia wykorzystano do opracowania modelu predykcyjnego, umożliwiającego jednokrokowe prognozowanie wartości koncentracji części stałych w nadawie z horyzontem predykcji równym okresowi próbkowania. Stwierdzono, że jednokrokowe prognozowanie oparte na wyznaczonym równaniu predyktora (13) daje wyniki zbieżne z zarejestrowanymi wartościami koncentracji części stałych w nadawie.

#### MODELING OF SOLIDS CONCENTRATION IN THE FEED FOR COAL FLOTATION

##### Key words

Coal flotation process, identification, model, control system, prediction

##### Abstract

In Polish control and monitoring solutions of coal flotation process usually only flow rate and solids concentration (from the feed parameters) are measured on-line. From the coal flotation control's point of view these values should be regarded as disturbances since they are subject to random disturbances of the time-varying feed. Random variations of the solids concentration in the feed can significantly affect both quantitative and qualitative parameters of coal flotation products. From this point of view a description of measuring solids concentration in the feed in the form of a mathematical model comes into particular importance. This article presents the results of the model identification of feed solids concentration sent to the coal flotation process as disturbance. Measurement data that are necessary to determine the empirical model of solids concentration in the feed are obtained from the recording carried out in the three successive periods of the industrial plant operation of one of the Polish mines. Solids concentration measurement has been performed by using a radiometric densitometer. The first series of measurement data was used to determine the model of solids concentration in the feed and the other two were used to validate the calculated model. Time series of solids concentration in the feed were described by the ARMA model of the form (1) and the model parameter estimation was made by a two-stage least squares method. The results of identification as well as the performed verification of the calculated model determined the validity of an adoption of ARMA model of the third order with parameters (9). Parameters of this ARMA model were determined on the basis of model error time-series described by a fourth order model (Table 1). The calculated model of feed solids concentration for the coal flotation as disturbance was used to develop a predictive model that allows the one-step prediction of solids concentration values in the feed with the prediction horizon equal to the sampling period. It was found that one-step prediction based on the determined predictor equation (13) gives the results that coincide with the recorded values of the solids concentration in the feed.

