



Pomiar gęstości ośrodka w osadzarce z użyciem gęstościomierza radiometrycznego z licznikiem impulsów

Stanisław CIERPISZ¹⁾, Jarosław JOOSTBERENS²⁾

¹⁾ ITI EMAG Katowice, Leopolda 31, 40-189 Katowice

²⁾ Politechnika Śląska, Gliwice, Wydział Górnictwa i Geologii, Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa, Akademicka 2, 44-100 Gliwice; email: jaroslaw.joostberens@polsl.pl

DOI: 10.29227/IM-2017-02-13

Streszczenie

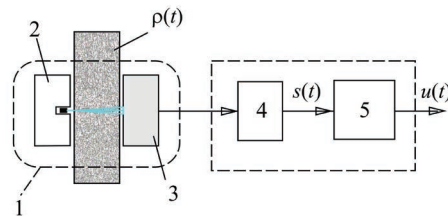
Gęstościomierze radiometryczne są stosowane do monitorowania różnych procesów technologicznych. Większość z nich wykorzystuje absorpcję promieniowania gamma. Podstawowym elementem gęstościomierza jest głowica pomiarowa, która składa się ze źródła promieniowania gamma (^{137}Cs) oraz detektora, zwykle w postaci licznika scyntylacyjnego. Sygnał z detektora jest ciągiem impulsów, który zawsze jest sygnałem stochastycznym o rozkładzie Poissona, niezależnie od charakteru sygnału wejściowego. Serie impulsów z detektora są często zliczane w czasie t_s za pomocą licznika. W takiej sytuacji licznik powinien być traktowany jako rodzaj cyfrowego filtra dolnoprzepustowego, którego parametrem jest czas pomiaru t_s . W czasie ustalonym (w przybliżeniu stała wartość gęstości w czasie) dłuższy czas t_s zwiększa dokładność pomiaru. Natomiast, kiedy gęstość istotnie zmienia się w czasie błąd dynamiczny różnie z nadmiernym wydłużaniem czasu pomiaru. Głównym problemem filtracji jest więc dobór wartości czasu pomiaru t_s , minimalizującego dynamiczny błąd pomiaru zgodnie z przyjętym kryterium. W przypadku znajomości przebiegu zmian gęstości w czasie można eksperymentalnie dobrać czas pomiaru, wykorzystując narzędzia do badań symulacyjnych. W takiej sytuacji znany przebieg gęstości należy traktować jako sygnał odniesienia. W przypadku wzbogacania węgla w osadzarce, gęstościomierz radiometryczny może być zastosowany do stabilizacji gęstości rozdziału i kształtu przebiegu gęstości ośrodka. W artykule przedstawiono metodę doboru czasu pomiaru t_s z wykorzystaniem wyznaczonych zmian gęstości ośrodka w czasie trzech kolejnych cykli pulsacji w osadzarce. Omówiono problemy oraz wady i zalety związane z cyfrowym przetwarzaniem sygnału z detektora, realizowanym wyłącznie za pomocą licznika impulsów. Model zmian gęstości ośrodka w czasie trzech cykli pulsacji został zidentyfikowany na podstawie wyników badań przemysłowych, a jego równanie zostało podane w artykule. Doboru parametru licznika impulsów tj. czasu pomiaru t_s , przy minimalizacji przyjętego kryterium, dokonano symulacyjnie. Wyniki badań symulacyjnych tabelaryzowano i przedstawiono w formie graficznej.

Słowa kluczowe: gęstościomierz radiometryczny, licznik impulsów, cyfrowe przetwarzanie sygnału, wzbogacanie węgla w osadzarce

Wprowadzenie

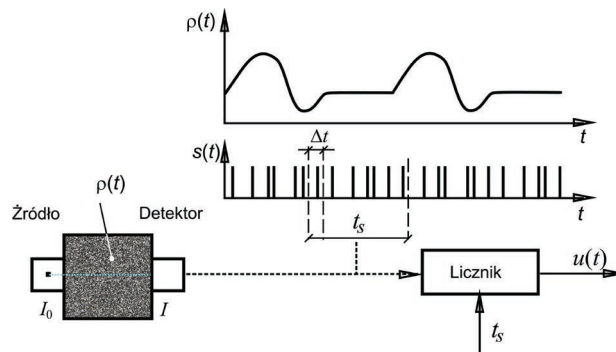
Gęstościomierze radiometryczne znalazły zastosowanie w układach monitoringu i sterowania procesów przeróbki węgla kamiennego takich jak: wzbogacanie w cieczy ciężkiej, wzbogacanie w osadzarce, flotacja węgla (Cierpisz 2016a; Cierpisz 2016b; Cierpisz i in. 1999; Cierpisz 2001; Clarkson i in. 1993). W układach sterowania procesu wzbogacania węgla w osadzarce położenie warstwy rozdziału materiału o wybranej gęstości określane jest za pomocą pływaka. Właściwe ustawienie warstwy rozdziału prowadzi do przemieszczania się górnej połowy tej warstwy oraz materiału warstw znajdujących się powyżej do produktu górnego, ponad progiem przelewowym osadzarki. Jednocześnie dolna połowa warstwy rozdziału wraz z warstwami położonymi poniżej przechodzi do produktu dolnego. Wymaga to stabilizowania położenia warstwy rozdziału na poziomie progów przelewowych przez natężenie przepływu produktu dolnego osadzarki, co w układach automatycznej regulacji jest trudne do osiągnięcia z powodu istotnych błędów pomiarowych pływaka. W najnowszych rozwiązaniach do kompen-

sacji tych błędów zaleca się uzupełnienie układu sterowania o gęstościomierz radiometryczny, umieszczony na odpowiedniej wysokości (Cierpisz. i in 2014; Lyman 1991; Loveday & Jonkres 2002). Sygnał wyjściowy z detektora promieniowania jądrowego, będącego elementem głowicy pomiarowej gęstościomierza radiometrycznego, jest ciągiem impulsów o charakterze stochastycznym i rozkładzie czasowym Poissona. Miarą mierzonej gęstości jest średnia częstość tych impulsów. W układzie gęstościomierza radiometrycznego licznik realizuje cykliczne zliczanie impulsów z detektora w określonym przedziale czasu, zwanym czasem pomiaru t_s , a uzyskiwane wartości przeliczane są według funkcji liniowej. Z uwagi na występujący w sygnale pomiarowym szum Poissona wyznaczone wartości chwilowe wielkości mierzonej obarczone są błędem. Dla krótkiego czasu pomiaru t_s obserwuje się duży udział w sygnale pomiarowym składowej szybkozmiennej o charakterze szumu. Wymóg utrzymania dokładności pomiaru na odpowiednim poziomie wymaga wydłużania czasu pomiaru, co prowadzić może do istotnego pogorszenia własności dynamicznych



Rys. 1. Podstawowe elementy gęstościomierza radiometrycznego
1 – głowica pomiarowa, 2 – źródło promieniowania, 3 – detektor, 4 – układ wzmacniający, 5 – licznik impulsów

Fig. 1. Basic elements of the radiometric density meter
1 – measuring head, 2 – source of radiation, 3 – detector, 4 – amplifier, 5 – pulse counter



Rys. 2. Cyfrowe przetwarzanie sygnału z detektora z użyciem licznika impulsów

Fig. 2. Digital signal processing from detector using a counter of pulses

gęstościomierza. To pokazuje, że w sytuacji zastosowanie licznika impulsów do cyfrowego przetwarzania sygnału z detektora promieniowania jądrowego, jego parametr, w postaci czasu pomiaru, powinien być dobrany w sposób zapewniający redukcję szumu w sygnale pomiarowym bez istotnego pogarszania własności dynamicznych gęstościomierza. Ma to szczególne znaczenie w przypadku zastosowania gęstościomierza radiometrycznego w układzie automatycznej regulacji procesu wzbogacania węgla w osadzarce, gdyż gęstość ośrodka cechuje duża zmienność w krótkim czasie odpowiadającym cyklowi pulsacji powietrza. Dobór wartości czasu pomiaru t_s można przeprowadzić przy znajomości przebiegu gęstości ośrodka podczas cyklu lub kolejnych cykli pulsacji powietrza. W artykule opisano metodę doboru czasu pomiaru przy wykorzystaniu znanego przebiegu gęstości ośrodka podczas trzech kolejnych cykli pulsacji. Przeprowadzono dobór czasu pomiaru t_s dokonując stosownych obliczeń. Jako materiał do badań posłużyło 10 serii symulowanych danych, reprezentujących sygnał pomiarowy z gęstościomierza zainstalowanego na wysokości progu przelewowego w osadzarce.

Gęstościomierz radiometryczny

Gęstościomierz radiometryczny zbudowany jest z układu elektronicznego oraz głowicy pomiarowej, w skład której wchodzi źródło promieniowania gamma oraz detektor (zwykle licznik scyntylacyjny).

Sygnał z detektora jest wzmacniany i po uformowaniu w postaci impulsów $s(t)$ kierowany jest na wejście licznika, który zlicza impulsy w przedziale czasu zwanym czasem pomiaru t_s .

W gęstościomierzu radiometrycznym wykorzystywana jest metoda absorpcji promieniowania gamma przechodzącego przez warstwę materiału (absorbenta) o gęstości ρ (rys. 2). Natężenie promieniowania mierzone przez detektor można wyrazić wzorem (Cierpisz 2012; Cierpisz 2005; Cierpisz i in. 2015):

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\mu d \rho(t)} \quad (1)$$

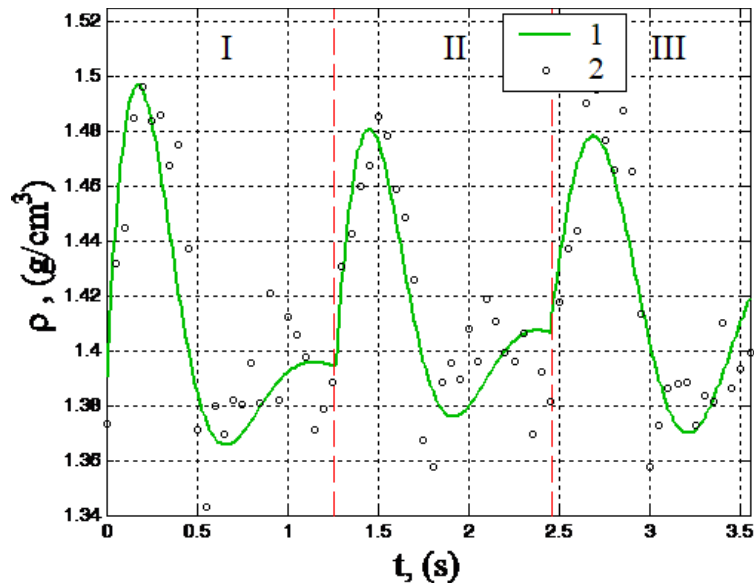
gdzie:

I_0 – natężenie promieniowania gamma bez absorbenta,
 μ – masowy współczynnik osłabienia promieniowania gamma,
 d – grubość absorbenta,
 ρ – gęstość warstwy absorbującej.

Przebieg na wyjściu detektora w postaci ciągu impulsów jest sygnałem stochastycznym o rozkładzie Poissona i średniej częstotliwości impulsów n :

$$p(k) = \frac{(nt)^k \cdot e^{-nt}}{k!} \quad (2)$$

gdzie:



Rys. 3. Zmiany gęstości ośrodka podczas trzech cykli pulsacji
1 – model, 2 – dane pomiarowe, I, II, III – cykle pulsacji

Fig. 3. Changes in media density over a three pulsation cycles
1 – model, 2 – measurement data, I, II, III – pulsation cycles

$p(k)$ – prawdopodobieństwo zliczenia k impulsów w czasie t .

Wartość sygnału na wyjściu gęstościomierza u jest proporcjonalna do liczby zliczonych impulsów w przedziale równym czasowi pomiaru t_s i w dyskretnych chwilach czasu można ją wyznaczyć z równania:

$$u[i] = \frac{1}{k_n} \cdot \left(n_0 - \frac{1}{t_s} \cdot k[i] \right) \quad (3)$$

gdzie:

n_0 – częstość impulsów dla gęstości referencyjnej (np. wody),

k_n – współczynnik proporcjonalności.

Liczbę zliczonych impulsów z równania (3) w przedziale czasu od $(t - t_s)$ do t można wyrazić wzorem:

$$k[i] = \sum_{l=1}^{t_s/\Delta t} S \left[\frac{t_s}{\Delta t} - l \right] \quad (4)$$

gdzie:

Δt – elementarny czas zliczania impulsów $\Delta t < t_s$,

S – zliczany impuls pojawiający się w elementarnym przedziale czasu.

Gęstościomierz radiometryczny można traktować jako generator szumu dyskretnego o rozkładzie czasowym Poissona i sterowanej średniej częstości impulsów na wyjściu detektora promieniowania (Cierpisz & Sobierajski 2014).

Przebieg gęstości ośrodka w osadzarce w czasie cyk-

lu pulsacji powietrza

W pierwszej fazie cyklu pulsacji powietrza, kiedy następuje uniesienie łoża przy braku rozluźnienia ziaren, widoczny jest wyraźny wzrost gęstości ośrodka. Wynika on z faktu wznoszenia się warstw o coraz większej gęstości. Następnie materiał ulega rozluźnieniu w wyniku czego mierzona gęstość ośrodka zaczyna maleć. Po czym w kolejnej fazie cyklu pulsacji zauważalny jest wzrost gęstości ośrodka, będący efektem osiągnięcia stanu skrępowania ziaren (Cierpisz 2012). Taki charakter zmian gęstości ośrodka podczas cyklu pulsacji widoczny jest na rysunku 3.

Rysunek 3 przedstawia przebiegi gęstości ośrodka w trzech kolejnych cyklach pulsacji powietrza w osadzarce. Przebiegi te wyznaczono na podstawie danych pomiarowych zarejestrowanych podczas badań przemysłowych, które podano w (Cierpisz & Joostberens 2016b). Jako model matematyczny opisujący przebieg gęstości ośrodka przyjęto równanie postaci:

$$\rho(t) = A(t) \cdot e^{-\alpha(t)t} \cdot \sin(\omega(t) \cdot t - \psi(t)) + \rho_u(t) \quad (5)$$

Estymację parametrów równania (5) przeprowadzono na podstawie danych pomiarowych, minimalizując wartość wskaźnika jakości dopasowania modelu do danych empirycznych o postaci (6). Wartości parametrów równania (5) wyznaczono dla każdego z trzech cykli pulsacji, uwzględniając zmianę ich wartości w tych okresach pracy, a uzyskane wyniki stabelaryzowano (Tabela 1).

$$J_\rho = \sum_{n=1}^N (\rho[n] - \rho_d[n])^2 \quad (6)$$

Tab. 1 Wartości parametrów modelu (5)

Tab. 1 Estimation results of the model parameters (5)

L.p.	cykl pulsacji	t (s)	α (1/s)	A (g/cm ³)	ω (rad/s)	ψ (rad)	ρ_u (g/cm ³)
1	I	0÷1.270	3.04	0.20	6.50	0.00	1.39
2	II	1.270÷2.457	2.60	3.74	6.77	2.32	1.40
3	III	2.457÷3.550	1.01	1.04	6.02	2.20	1.41

Tab. 2. Wyniki badań symulacyjnych

Tab. 2. Simulation results

L.p.	Nr serii danych	t_s (ms)					
		a	b	c	d	e	f
		cykl/cykle pulsacji powietrza w osadzarce					
		I	II	III	I i II	II i III	I, II, III
1.	1	28	50	47	38	46	38
2.	2	37	31	28	31	31	31
3.	3	45	60	31	45	47	47
4.	4	45	36	29	45	36	45
5.	5	39	41	33	39	45	39
6.	6	38	43	45	35	37	38
7.	7	46	44	38	46	44	44
8.	8	29	39	41	33	39	44
9.	9	26	39	36	42	39	44
10.	10	38	36	39	47	36	38
11.	Me	38	40	37	41	39	41
12.	\bar{t}_s	37	42	37	40	40	41

gdzie:

$\rho[n]$ – wartość wielkości wyjściowej modelu dla n -tej obserwacji,

$\rho_m[n]$ – zmierzona wartość gęstości ośrodka w dyskretnej chwili czasu,

N – liczba danych pomiarowych.

Jak pokazują uzyskane wyniki (rys. 3) przebieg zmian gęstości ośrodka podczas trzech kolejnych cykli pulsacji, obejmujących czas równy 3.55 s, dostatecznie dokładnie można opisać równaniem postaci (5).

Dobór czasu pomiaru

W torze pomiarowym gęstościomierza radiometrycznego licznik impulsów stanowi rodzaj dolnoprzepustowego filtru cyfrowego, którego parametrem jest czas zliczania impulsów (czas pomiaru t_s). Wprowadza on opóźnienie czasowe równe co najmniej wartości czasu t_s . Z uwagi na występujący w układzie pomiarowym szum Poissona wyznaczona wartość gęstości u na wyjściu układu pomiarowego w dyskretnej chwili czasu obciążona jest błędem $e[i] = u[i] - \rho[i]$. Wartość czasu pomiaru t_s powinna być tak dobrana, aby różnica wartości zmierzonej i wartości sygnału użytecznego (gęstości) w chwili czasu its była równa wartości błędu $e[i]$, a więc w każdej chwili czasu powinna zachodzić relacja (7).

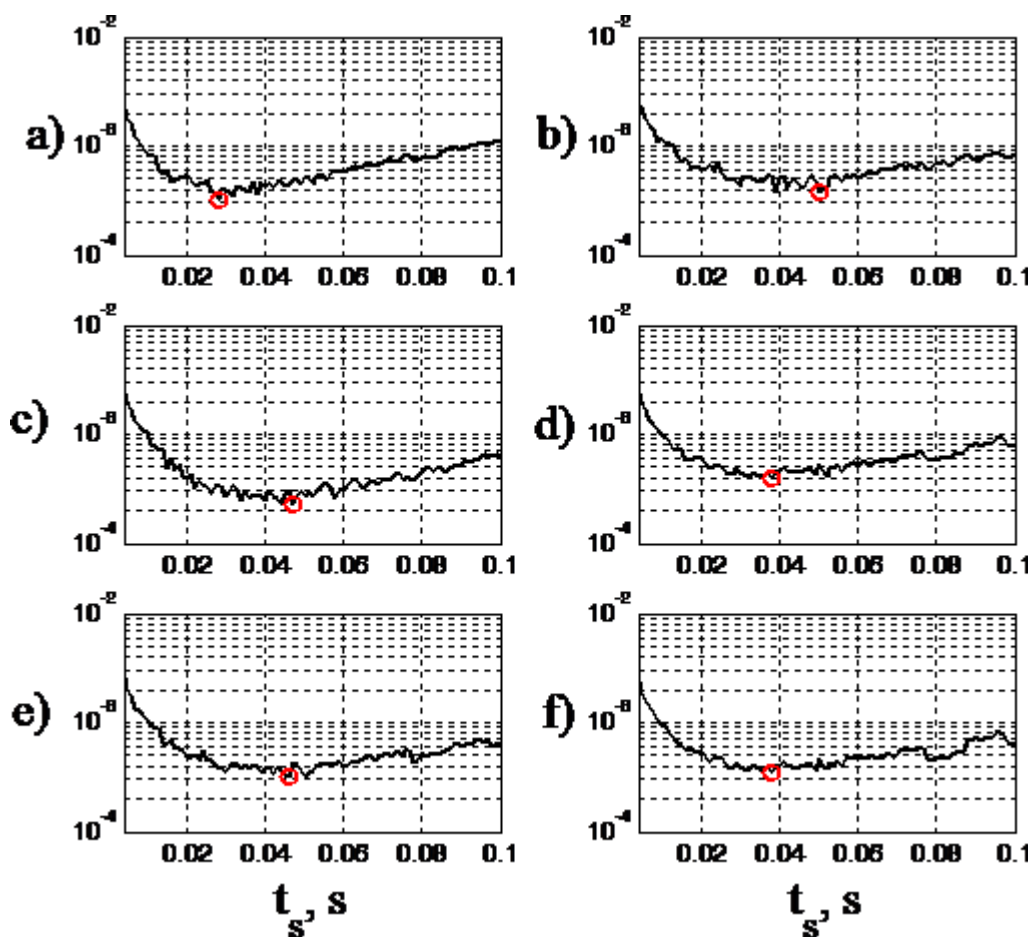
$$u[i] = \rho[i] \quad (7)$$

W przypadku pomiaru przebiegu gęstości dobor wartości t_s zapewniającej spełnienie zależności (7) jest trudny i możliwy do spełnienia tylko w przybliżeniu. Zapewnienie odpowiedniej dokładności wymaga wydłużania czasu pomiaru, co pogarsza własności dynamiczne gęstościomierza przyczyniając się do wzrostu błędu dynamicznego. Krótki czas pomiaru prowadzi do poprawy własności dynamicznych, ale zwiększa udział szumu w sygnale pomiarowym. Wynika z tego, że czas pomiaru t_s powinien mieć wartość dobraną w sposób umożliwiający redukcję szumu w sygnale pomiarowym w dostatecznym stopniu, bez istotnego pogarszania własności dynamicznych gęstościomierza radiometrycznego. Zadanie to można zrealizować przy znajomości przebiegu gęstości ośrodka w osadzarce lub jego przybliżenia podczas kolejnych cykli pulsacji powietrza. W takim przypadku za miarę dokładności odtwarzania sygnału użytecznego (gęstości) z sygnału pomiarowego przyjmując można błąd średniokwadratowy, definiowany jako:

$$MSE_c = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (u[j] - \rho[j])^2 \quad (8)$$

gdzie:

M – liczba danych służących do wyznaczenia parametru t_s .



Rys. 4. Zależność MSEc od czasu pomiaru t_s a)-f) przypadki z tabeli 2 – seria danych 1

Fig. 4. MSEc as a function of measurement time t_s a)-f) cases from the table 2 – data series 1

Dobór parametru licznika można sformułować jako zadanie optymalizacyjne, polegające na wyznaczeniu takiego czasu pomiaru t_s dla którego kryterium (6) osiągnie minimum.

Badania symulacyjne

Zadanie badawcze obejmowało wyznaczenie czasu pomiaru t_s , jako parametru licznika impulsów, na podstawie symulowanych przebiegów (rys. 3), reprezentujących zmiany w czasie gęstości ośrodka, podczas trzech kolejnych cykli pulsacji powietrza w osadzarce. Ciągi impulsów, odwzorowujące sygnał z detektora promieniowania gamma przy zmieniającej się gęstości ośrodka (rys. 3), wygenerowano korzystając z modelu symulacyjnego opisanego w (Joostberens 2017). Dla symulowanych w ten sposób 10 serii danych wyznaczono wartości parametru licznika (t_s), dla których minimum osiągało wyrażenie (8). Obliczenia przeprowadzono w sześciu wariantach – dla czasów każdego cyklu pulsacji powietrza z osobna, dla dwóch następujących po sobie cykli (I i II, II i III) oraz dla pełnego przebiegu (trzy cykle). W każdym przypadku badano zależność kryterium (8) od parametru t_s .

Wyniki badań symulacyjnych

Wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiono w tabeli 2. Dla jednej serii danych przykładowe wyniki badań symulacyjnych przedstawiono graficznie (rys. 4) w postaci zależności kryterium (8) od czasu pomiaru dla wszystkich wariantów obliczeń.

Uzyskane wyniki w postaci optymalnych, w sensie przyjętego kryterium, czasów pomiaru t_s , są niejednoznaczne. W każdym z wariantów obliczeń wartości parametru licznika t_s jako filtru, wyznaczone dla dziesięciu wygenerowanych ciągów impulsów, wykazują istotny rozrzut. Czas pomiaru obliczony dla pierwszego cyklu pulsacji zawiera się w przedziale 26÷46 ms, dla drugiego 31÷60 ms, a dla trzeciego 28÷47 ms. Z kolei wartości parametru t_s wyznaczone na podstawie dwóch (I i II oraz II i III) i trzech cykli pulsacji powietrza w osadzarce mieszczą się w zakresie 31÷47 ms. Mediany i wartości średnie wyznaczone dla poszczególnych wariantów doboru czasu t_s są zbliżone i nie są niższe niż 37 i wyższe niż 42 ms. Wynika z tego wniosek, iż stosując wyłącznie licznik impulsów do przetwarzania sygnału z detektora promieniowania, wartości czasu pomiaru należałoby przyjmować z tego

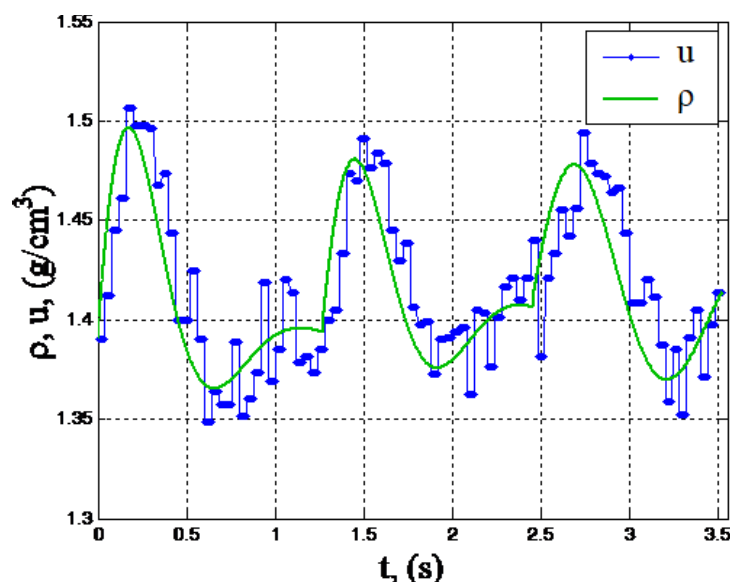


Fig. 5. Przebieg sygnału na wyjściu licznika impulsów na tle sygnału użytecznego (tabela 2 – seria danych 2)

Fig. 5. The changes in signal over time at the output of counter set against the real density signal (table 2 – data series 2)

zakresu – przykładowo $t_s = 40$ ms. Przebieg sygnału z gęstościomierza przy takiej wartości t_s przedstawiono na rysunku 5. Jak widać na tym rysunku sygnał z gęstościomierza radiometrycznego u wykazuje dostateczną zbieżność ze zmianami gęstości ośrodka $\rho(t)$ podczas trzech cykli pulsacji powietrza w osadzarce. W sygnale pomiarowym widoczne są fluktuacje oraz przesunięcie czasowe, zbliżone do wartości dobranego czasu pomiaru. To pokazuje, że cyfrowe przetwarzanie sygnału z detektora promieniowania z użyciem licznika impulsów o dobranym czasie pomiaru $t_s = 40$ ms jest rozwiązaniem kompromisowym, umożliwiającym utrzymanie dokładności pomiaru na zadowalającym poziomie, bez istotnego pogarszania własności dynamicznych gęstościomierza.

Na podstawie analizy porównawczej uzyskanych wyników można stwierdzić, iż czasy pomiaru wyznaczone dla dwóch cykli pulsacji (I i II, II i III tab. 2, wariant d i e) wykazują wyraźną zbieżność z wynikami obliczeń przeprowadzonymi na podstawie trzech cykli (I,II,III - tab. 2, wariant f) dla każdej z 10 serii danych, a więc inaczej niż ma to miejsce w przypadku wartości uzyskanych w oparciu o dane z jednego cyklu pulsacji powietrza. To pokazuje, iż wartość parametru licznika t_s należy wyznaczać dla czasów nie krótszych niż dwa cykle pulsacji powietrza. Wynika to z faktu możliwości występowania czasu opóźnienia większego niż czas pomiaru t_s . Taka sytuacja ma miejsce wówczas, gdy mierzona wartość gęstości, wyznaczona w ostatnich chwilach jednego cyklu pulsacji powietrza, utrzymywana będzie na wyjściu gęstościomierza przez pewien czas, równy fragmentowi czasu pomiaru t_s początkowych chwilach cyklu następnego. Wniosek ten jest szczególnie istotny w sytuacji zastosowania algorytmu

adaptacyjnego, polegającego na doborze parametru licznika t_s na podstawie danych z jednego cyklu pulsacji powietrza w osadzarce. Dobór czasu pomiaru t_s przedstawioną metodą bazuje na znajomości rzeczywistego przebiegu zmian gęstości ośrodka podczas cyklu (cykli) pulsacji powietrza w osadzarce. Jest to wada tej metody, gdyż przebieg gęstości w sensie ilościowym lub przybliżenie zmian w czasie gęstości ośrodka nie są znane. Wykorzystanie modelu (5) do wyznaczenia przebiegu gęstości ośrodka wymaga identyfikacji parametrów tego równania, co jest zadaniem trudnym i czasochłonnym. Znacznie korzystniejszymi rozwiązaniami, zarówno pod względem identyfikacji sygnału odniesienia w postaci modelu przebiegu gęstości oraz samej filtracji cyfrowej sygnału z detektora, są metody opisane w pracach (Cierpisz & Joostberens 2016a; Cierpisz & Joostberens 2016b). Zaletą stosowania licznika impulsów jako filtru cyfrowego w torze pomiarowym układu gęstościomierza jest prostota działania i w pewnych przypadkach może być rozwiązaniem wystarczającym.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono model zmian gęstości ośrodka w osadzarce podczas trzech kolejnych cykli pulsacji, wyznaczony na podstawie danych uzyskanych podczas badań przemysłowych. W oparciu o zidentyfikowany przebieg gęstości ośrodka, obejmujący trzy cykle pulsacji powietrza w osadzarce, dokonano doboru czasu pomiaru, stanowiącego parametr licznika impulsów z detektora promieniowania. Uzyskane wyniki pokazują, iż dobór czasu pomiaru z użyciem przebiegu gęstości ośrodka jest możliwy, zapewniając jednak jedynie pośrednie cechy gęstościomierza radiometry-

cznego pomiędzy odpowiednią dokładnością pomiaru, a jego dobrymi własnościami dynamicznymi. Z uwagi na charakter pracy, licznik impulsów zawsze wprowadza opóźnienie sygnału z gęstościomierza w stosunku do rzeczywistego przebiegu gęstości ośrodka. Na podstawie wyników badań stwierdzono, iż proces doboru

parametru licznika należy przeprowadzić w oparciu o przebieg gęstości ośrodka co najmniej dwóch cykli pulsacji powietrza w osadzarkach, w celu minimalizacji opóźnienia czasowego sygnału mierzonego względem sygnału rzeczywistego.

Literatura – References

1. Cierpisz. S. (2002). Automatyczna regulacja w układach zawieszinowych wzbogacalników węgla. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
2. Cierpisz. S. (2012). Automatyczna regulacja procesu wzbogacania węgla w osadzarkach. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
3. Cierpisz. S. (2001). Komputerowe systemy monitoringu i sterowania w zakładach wzbogacania węgla. *Inżynieria Mineralna - Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, str. 23–32.
4. Cierpisz S. (2005). Parametry jakości węgla – pomiary i sterowanie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
5. Cierpisz. S., Gola M., Kryca M., Sobierajski W. (2014). Radiometryczny gęstościomierz OS-C dla osadzarki – zasada działania. Konferencja Przeróbka Kopalni, str. 41–52.
6. Cierpisz S., Cierpisz T., Król S., Joostberens J., Piwowar E. (1999). Automatyczna regulacja procesu flotacji węgla w Zakładzie Wzbogacania Węgla Kopalni „Sośnica”. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 7/346, str. 7–14
7. Cierpisz S., Kryca M., Sobierajski W. (2015). Miernik naturalnego promieniowania węgla w osadzarkach. Konferencja EMTECH 2015, Zakopane.
8. Cierpisz S., Joostberens J. (2016). Monitoring of coal separation in a jig using a radiometric density meter, *Measurement (Elsevier)*, Volume 88, pp. 147–152.
9. Cierpisz S., Joostberens J. (2016). Optimization of a Radiometric Density Meter for Monitoring of a Coal Separation Process in a Jig. 17th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, Vienna (Austria), pp. 45–50.
10. Cierpisz S., Sobierajski W. (2014). Dynamiczne własności radiometrycznego gęstościomierza dla osadzarki. Konferencja Przeróbka Kopalni, str. 104–111.
11. Clarkson C., Hornsby D., Walker. D. (1993). Automatic Flotation Control using On-Stream Ash Analysis, *Coal Preparation Vol. 12*, pp 41–64.
12. Joostberens J. (2017). Model symulacyjny gęstościomierza radiometrycznego. *Systemy i wspomaganie w inżynierii produkcji*. Wydawnictwo P.A. Nova, Volume 6, issue 2.
13. Loveday, G., Jonkers, A. (2002). The Apic jig and the ScanJig controller take the guess-work out of jigging. *Proceedings of the 14th ICPC*. Johannesburg, RSA, 247–251
14. Lyman. G.J. (1992). Review of jigging principles and Control. *Coal Preparation*, 11, 1992, pp. 145–165.

Measurement of a Media Density in a Jig Using Radiometric Density Meter with a Counter of Pulses

Radiometric density meters are used to monitor many different technological processes. Most of them use gamma-ray absorption. Basic element of the meter is a measuring head that consists of a radiation source (^{137}Cs) and a detector usually in the form of a scintillation counter. The output signal from the detector is the sequence of pulses which is always a stochastic signal with Poisson distribution, regardless of the character of the input signal. The series of pulses are often counted during the time t_s in a counter. In that situation the counter should be considered as a kind of a low-pass digital filter whose parameter is a time of measurement t_s . The longer the time of measurement t_s , the higher the accuracy of the monitor in steady state. When density varies, the dynamic error of measurement increases with the excessive lengthen of measurement time t_s . The main filtration problem is a selection of value of the measurement time to minimise the dynamic error of measurement according to accepted criterion. The measurement time can be determined experimentally by simulation when the shape of density changes is known. In that situation, the known shape of density should be treated as a reference signal. In case of coal separation process in a jig the radiometric densitometer can be used to stabilize the separation density and the shape of density dynamic changes. The paper presents the method of selection of the measurement time using the computed changes density of three following cycles in the jig. Problems, advantages and disadvantages associated with using only the counter for digital signal processing from the detector of radiometric densitometer are discussed. Model of the density changes, during three cycles of the separation process in a jig, was identified based on results of industrial tests and its equation is given in the paper. Selection of the counter parameter, that is the measurement time, was done by the simulation minimizing the value of accepted criterion. Simulation results were tabulated and presented in the graphic form.

Keywords: radiometric density meter, counter of pulses, digital signal processing, coal separation process in a jig