

11

MODEL SYMULACYJNY GĘSTOŚCIOMIERZA RADIOMETRYCZNEGO

11.1 WPROWADZENIE

Gęstościomierze radiometryczne wykorzystuje się w układach monitoringu i sterowania różnych procesów technologicznych, w tym również procesów przeróbki węgla kamiennego takich jak: wzbogacanie w cieczy ciężkiej, wzbogacanie w osadzarkach, flotacja węgla. Działają one na zasadzie absorpcji promieniowania gamma, a więc zawierają źródło promieniowania gamma i detektor. Zastosowanie gęstościomierzy radiometrycznych do pomiaru koncentracji części stałych w nadawie do flotacji węgla kamiennego oraz w sterowania tym procesem przedstawiono w pracach [6, 9]. Natomiast wykorzystanie tych czujników do kontroli procesu wzbogacania węgla w osadzarkach opisano w [2, 3, 5, 10]. Całość zagadnień obejmujących układy regulacji wzbogacalników zawieszinowych z cieczą ciężką zawarto w pracy [1].

Dogodnym narzędziem analizy pracy układu sterowania procesem technologicznym (z wykorzystaniem gęstościomierza radiometrycznego) są badania symulacyjne. Umożliwiają one w krótkim czasie ocenę pracy wybranych algorytmów sterowania i mogą prowadzić do istotnego obniżenia kosztów związanych z uruchomieniem układu sterowania danego obiektu w warunkach przemysłowych. Opracowanie modelu symulacyjnego gęstościomierza radiometrycznego, jako istotnego elementu układu sterowania, znajduje swoje uzasadnienie zarówno w kontekście badań symulacyjnych obejmujących pracę układu sterowania danego procesu przemysłowego, jak i w zakresie doboru parametrów elementów służących do cyfrowego przetwarzania sygnału z detektora samego gęstościomierza. W artykule opisano opracowany model symulacyjny gęstościomierza radiometrycznego. Przedstawiono również przykładowe wyniki badań symulacyjnych w formie graficznej.

11.2 GĘSTOŚCIOMIERZ RADIOMETRYCZNY

Działanie gęstościomierza radiometrycznego opiera się na zasadzie absorpcji promieniowania gamma przechodzącego przez warstwę materiału (absorbenta) o gęstości ρ (rys. 11.1). Natężenie promieniowania po przejściu przez absorbent

opisuje równanie [2, 4, 5]:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\mu d \rho(t)} \quad (11.1)$$

gdzie:

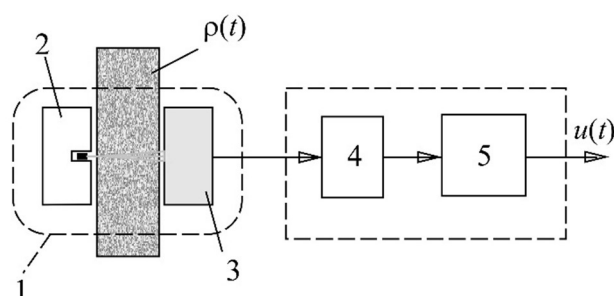
I_0 – natężenie promieniowania gamma bez absorbenta,

μ – masowy współczynnik osłabienia promieniowania gamma,

d – grubość absorbenta,

ρ – gęstość warstwy absorbującej.

Gęstościomierz radiometryczny jest systemem pomiarowym, w którym następuje pomiar i przetworzenie informacji. W jego skład wchodzi głowica pomiarowa i układ elektroniczny (rys. 11.1).



Rys. 11.1 Podstawowe elementy gęstościomierza radiometrycznego:
1 – głowica pomiarowa, 2 – źródło promieniowania, 3 – detektor, 4 – układ wzmacniający,
5 – licznik impulsów

Głowica pomiarowa gęstościomierza składa się ze źródła promieniowania gamma (^{137}Cs) oraz detektora promieniowania, zwykle w postaci licznika scyntylicyjnego. Ciąg impulsów na wyjściu detektora jest sygnałem stochastycznym o rozkładzie Poissona i średniej częstości impulsów n :

$$p(k) = \frac{(nt)^k \cdot e^{-nt}}{k!} \quad (11.2)$$

gdzie:

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

Dla niewielkich zmian gęstości ośrodka z uwagi na charakter sygnału na wyjściu detektora oraz, że $n(t)$ jest proporcjonalne do $I(t)$, średnią częstość impulsów można opisać przybliżoną zależnością [2, 7, 8]:

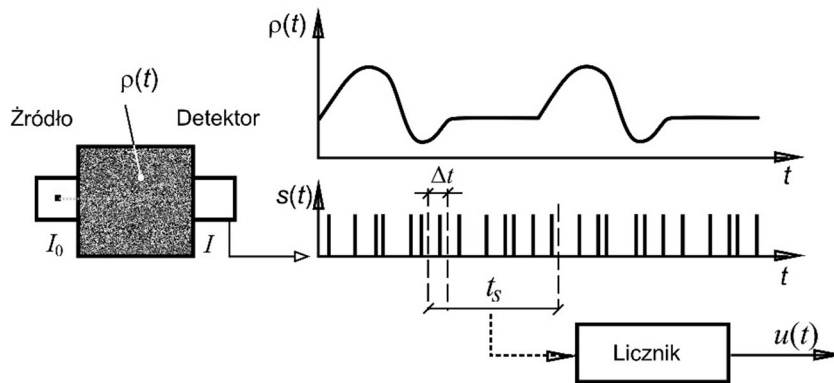
$$n(t) = n_0 - k_n \cdot \rho(t) \quad (11.3)$$

gdzie:

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

k_n – współczynnik proporcjonalności.

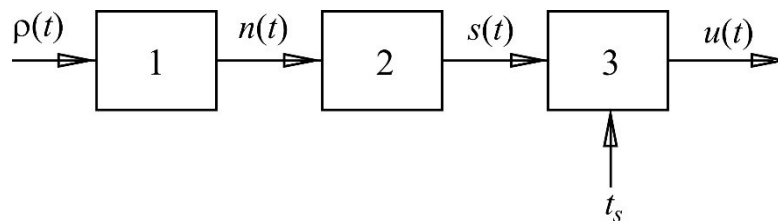
Sygnał z licznika scyntylicyjnego, po wzmacnieniu i uformowaniu, w postaci ciągu impulsów podawany jest na wejście licznika impulsów. Licznik impulsów zlicza impulsy sygnału wejściowego w określonym przedziale czasu zwanym czasem pomiaru t_s , czyli tak jak to pokazano schematycznie na rysunku 11.2.



Rys. 11.2 Przetwarzanie sygnału z detektora z użyciem licznika impulsów

11.3 MODEL SYMULACYJNY

Model symulacyjny gęstościomierza radiometrycznego przedstawiono w postaci schematu blokowego na rysunku 11.3.



Rys. 11.3 Schemat blokowy modelu symulacyjnego gęstościomierza radiometrycznego
1 – głowica pomiarowa, 2 – generator szumu Poissona, 3 – licznik

Sygnał z detektora promieniowania występuje w postaci przypadkowego ciągu impulsów elektrycznych o średniej częstotliwości będącej miarą gęstości [2]. W modelu symulacyjnym ciąg impulsów $s(t)$, odwzorowujący sygnał na wyjściu detektora gęstościomierza radiometrycznego, jest również przebiegiem o rozkładzie Poissona i średniej częstotliwości impulsów n modulowanej sygnałem gęstości ρ zgodnie z równaniem (3) – blok 1 i 2. Z uwagi na wykładniczy rozkład zmiennych losowych w procesie Poissona wartość czasu kolejnej próbki można wyznaczyć z równania:

$$T_i = -\frac{\ln(R)}{n} \quad (11.4)$$

gdzie:

R – losowa liczba z przedziału od 0 do 1.

W modelu symulacyjnym (blok 2, rys. 11.3) wyznaczone wartości T_i transformowane do określonych kolejnych, wąskich okien czasowych, tworzą na osi czasu ciąg impulsów z rozkładem Poissona. Amplitudę impulsów znormalizowano do wartości 1.

Wartość sygnału na wyjściu gęstościomierza $u[i]$ w dyskretnych chwilach czasu jest proporcjonalna do liczby zliczonych impulsów i wyznacza się ją zgodnie z wzorem:

$$u[i] = \frac{1}{k_n} \cdot \left(n_0 - \frac{1}{t_s} \cdot k[i] \right) \quad (11.5)$$

gdzie:

$$i = t/t_s.$$

Z kolei liczbę impulsów w dyskretnej chwili czasu i zliczonych w oknie czasowym o wartości równej t_s , a więc zliczonych w przedziale czasu od $(t - t_s)$ do t , można przedstawić równaniem:

$$k[i] = \sum_{l=1}^{t_s/\Delta t} S \left[\frac{t_s}{\Delta t} - l \right] \quad (11.6)$$

gdzie:

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

S – zliczany impuls pojawiający się w elementarnym przedziale czasu.

Równania (11.5) i (11.6) są równaniami modelu licznika impulsów (blok 3). Łatwo zauważyć, że licznik impulsów ma własności filtracyjne. Jest on rodzajem cyfrowego filtra dolnoprzepustowego, którego parametrem jest czas pomiaru t_s .

11.4 BADANIA SYMULACYJNE – WARUNKI I ZAKRES

Wartość sygnału na wyjściu gęstościomierza radiometrycznego zmienia się co okres równy czasowi pomiaru t_s , a więc jest on obserwowany w sposób dyskretny z okresem próbkowania równym temu czasowi. W ogólnym przypadku sygnał na wyjściu gęstościomierza radiometrycznego w chwili czasu it_s opisuje równanie:

$$u[i] = \rho[i] + e[i] \quad (11.7)$$

gdzie:

ρ – gęstość ośrodka,

e – błąd.

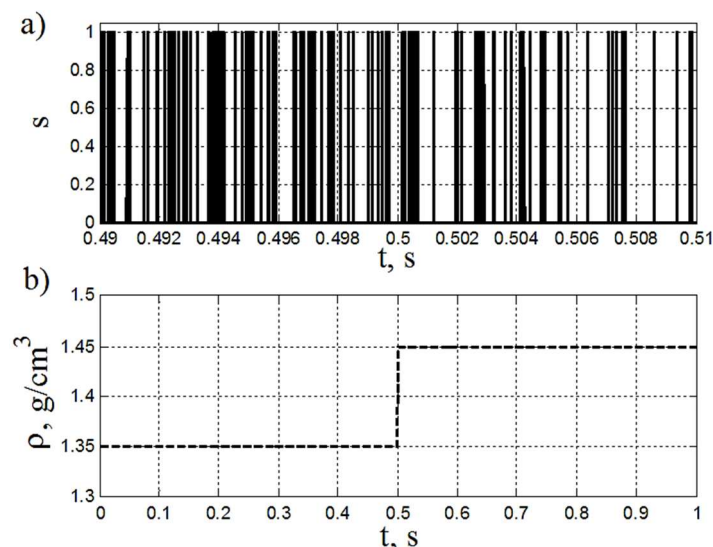
Przebieg gęstości ośrodka $\rho(t)$ jest sygnałem użytecznym i czas pomiaru (t_s) licznika impulsów powinien być tak dobrany, aby wartość błędu e w każdej chwili czasu była jak najmniejsza. Zatem zadaniem licznika impulsów jako filtra dolnoprzepustowego jest takie tłumienie występującego w sygnale szumu, aby przebieg sygnału wyfiltrowanego u był jak najbardziej zbliżony do przebiegu sygnału użytecznego ρ . Wymuszenie skokowe jest typowym sygnałem służącym ocenie własności dynamicznych obiektów, a więc i gęstościomierza radiometrycznego. W ramach badań symulacyjnych, w celu sprawdzenia poprawności modelu, wygenerowano ciąg impulsów $s(t)$, o przebiegu modulowanym skokową zmianą sygnału użytecznego, reprezentującego przebieg gęstości ośrodka. Jako czas trwania symulowanego przebiegu przyjęto 1 s, co odpowiada okresowi pulsacji powietrza w osadzarce [2, 5, 7, 8]. W celu wstępnej oceny wpływu parametru licznika impulsów na własności dynamiczne gęstościomierza radiometrycznego zastosowano dwa czasy pomiaru t_s krótki (5 ms) i długi (100 ms). Następnie wygenerowany sygnał pobudzający w postaci skokowej zmiany gęstości ośrodka wykorzystano do wyznaczenia wartości parametru t_s , przyjmując błąd średniokwadratowy MSE_c o równaniu (11.8) jako kryterium dopasowania sygnału z gęstościomierza u do sygnału użytecznego ρ .

$$MSE_c = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (u[j] - \rho[j])^2 \quad (11.8)$$

W tym przypadku dobór parametru filtra, sprowadza się do wyznaczenia takiego czasu pomiaru t_s , dla którego kryterium wyrażone wzorem (11.8) osiągnie wartość minimalną. Wartości błędu średniokwadratowego dla różnych czasów pomiaru t_s , wyznaczono przyjmując okres próbkowania równy 1 ms. Współczynniki występujące w równaniach modelu (11.2), (11.3) i (11.5) wynoszą: $n_0 = 32500$ 1/s, $k_d = 0,1$, $k_n = 2 \cdot 10^{-4}$ 1/s/g/cm³.

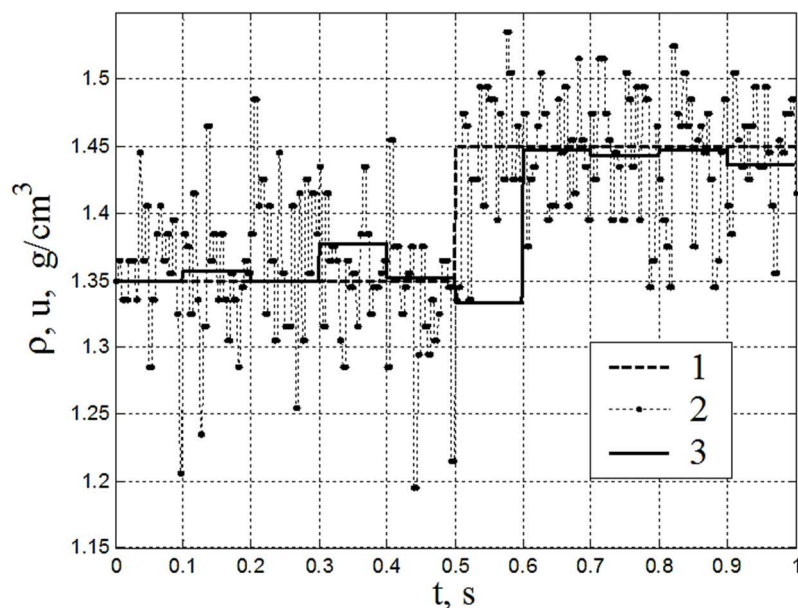
11.5 WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Fragment zasymulowanego ciągu impulsów z detektora promieniowania przedstawiono na rysunku 11.4a dla wąskiego przedziału czasowego obejmującego chwilę skokowej zmiany gęstości ośrodka (rys. 11.4b). Jak widać na rysunku 11.4 model odwzorowuje sygnał z detektora promieniowania w postaci ciągu impulsów (o unormowanych wartościach amplitud), z rozkładem czasowym Poissona.



Rys. 11.4 Sygnał wyjściowy z detektora promieniowania oraz symulowany przebieg gęstości

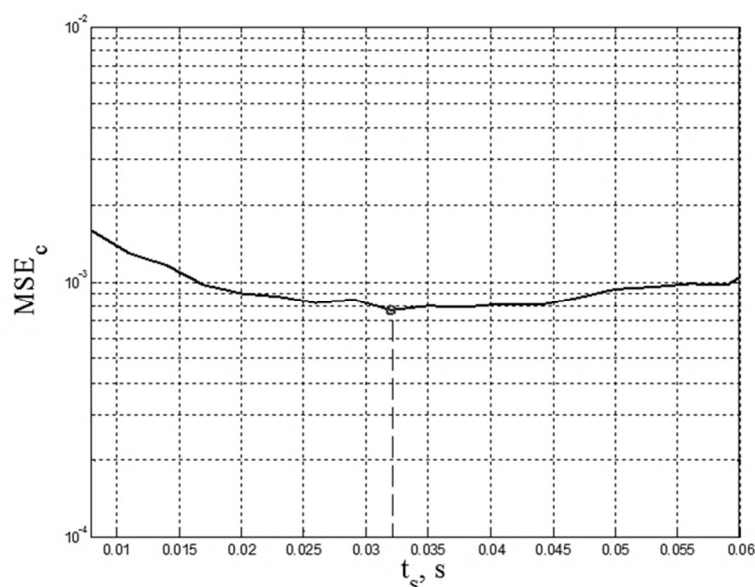
Przebiegi uzyskane z modelu symulacyjnego gęstościomierza radiometrycznego dla dwóch czasów pomiaru t_s – krótkiego i długiego, przedstawiono na rysunku 11.5. Jak widać na tym rysunku, długi czas zliczania impulsów prowadzi do redukcji szumu w sygnale z gęstościomierza jednocześnie wprowadzając wyraźne przesunięcie czasowe pomiędzy przebiegiem gęstości $\rho(t)$, a sygnałem obserwowanym na wyjściu gęstościomierza. W przypadku krótkiego czasu pomiaru zauważyć można szybką odpowiedź gęstościomierza na skokową zmianę prędkości, ale uzyskany sygnał jest znacznie bardziej obciążony szumem aniżeli przebieg przy dużej wartości parametru t_s .



Rys. 11.5 Przebieg gęstości oraz sygnałów na wyjściu gęstościomierza dla dwóch czasów pomiaru

1 - $\rho(t)$, 2 - $u(t)$ dla $t_s = 5 \text{ ms}$, 3 - $u(t)$ dla $t_s = 100 \text{ ms}$

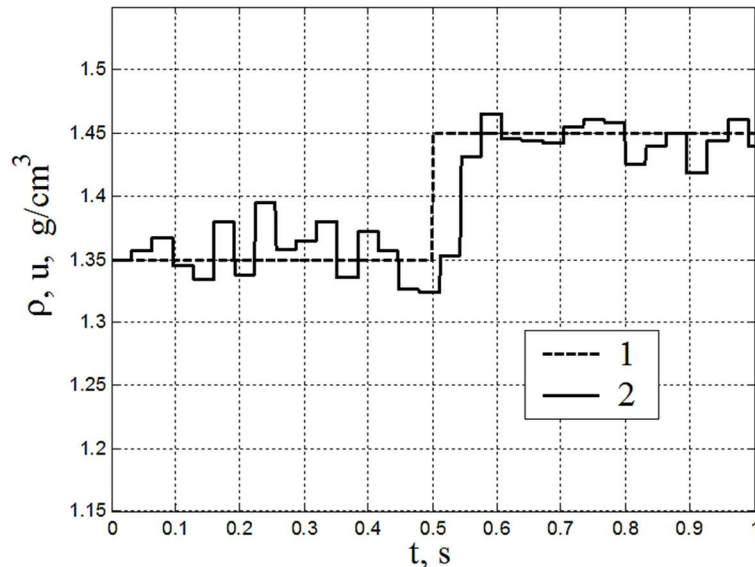
Dobór właściwej wartości parametru licznika impulsów możliwy jest na drodze symulacji komputerowej poprzez wyznaczenie takiego czasu pomiaru, dla którego minimalizowana będzie wartość kryterium (11.8).



Rys. 11.6 Zależność MSE_c od czasu pomiaru

W ramach badań symulacyjnych dokonano wyznaczenia wartości kryterium MSE_c dla sygnałów z gęstościomierza dla czasów pomiaru z przedziału $t_s = (8-60)$ ms. Uzyskane rezultaty przedstawiono graficznie (rys. 11.6). Minimalną wartość kryterium (11.8) w tych warunkach uzyskano dla czasu pomiaru równego 32 ms. Przebieg sygnału z gęstościomierza z filtrem dolnoprzepustowym w postaci licznika

impulsów o czasie pomiaru równym 32 ms przedstawiono na rysunku 11.7.



Rys. 11.7 Przebieg gęstości oraz sygnału na wyjściu gęstościomierza dla czasu pomiaru $t_s = 32$ ms, 1 - $\rho(t)$, 2 - $u(t)$

Na rysunku 11.7 zauważyć można, że gęstościomierz na skokową zmianę gęstości szybciej odpowiada niż w przypadku długiego czasu pomiaru (100 ms), wprowadzając mniejsze opóźnienie czasowe względem sygnału użytecznego. Jednocześnie w sygnale pomiarowym występują fluktuacje o większych wartościach względem sygnału $\rho(t)$ niż w przypadku przebiegu uzyskanego dla czasu pomiaru 100 ms, ale istotnie mniejsze niż dla krótkiego czasu pomiaru (11.5). Takie rozwiązanie stanowi kompromis pomiędzy dobrymi własnościami dynamicznymi miernika, a utrzymaniem dokładności pomiaru na odpowiednim poziomie. To pokazuje, że przy zastosowaniu wyłącznie licznika impulsów jako filtru dolnoprzepustowego nie można uzyskać szybkiej reakcji układu na skokową zmianę gęstości przy jednoczesnym dobrym tłumieniu występującego w sygnale szumu.

11.6 PODSUMOWANIE

W układach automatycznej regulacji procesów przeróbki węgla, a w szczególności procesu wzbogacania węgla w osadzarce, gęstościomierze powinny cechować dobre własności dynamiczne. Sygnał z detektora promieniowania gęstościomierza radiometrycznego jest ciągiem impulsów, który jest sygnałem stochastycznym o rozkładzie czasowym Poissona. Z uwagi na występujący w układzie szum Poissona sygnał na wyjściu gęstościomierza z licznikiem impulsów jako filtrem obarczony jest błędem pomiarowym uzależnionym od czasu, w którym zliczane są impulsy (parametr t_s). Utrzymanie dokładności pomiaru na odpowiednim poziomie wymusza wydłużanie czasu pomiaru t_s . Z drugiej zaś strony dłuższy czas zliczania impulsów t_s prowadzi do pogorszenia własności dynamicznych gęstościomierza. Opracowany model

symulacyjny umożliwi odwzorowanie pracy gęstościomierza radiometrycznego, co stwarza dogodne warunki w zakresie prac badawczych, prowadzonych na drodze eksperymentu symulacyjnego, ukierunkowanych na kwestie doboru parametru licznika impulsów lub opracowania innych rozwiązań technicznych poprawiających własności dynamiczne gęstościomierza bez pogarszania jego dokładności pomiaru.

LITERATURA

1. S. Cierpisz. *Automatyczna regulacja w układach zawieszinowych wzbogacalników węgla*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2002.
2. S. Cierpisz. *Automatyczna regulacja procesu wzbogacania węgla w osadzarkach*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012.
3. S. Cierpisz. „Komputerowe systemy monitoringu i sterowania w zakładach wzbogacania węgla.” *Inżynieria Mineralna*, R. 2, nr 2, pp. 23-32, 2001.
4. S. Cierpisz. *Parametry jakości węgla – pomiary i sterowanie*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2005.
5. S. Cierpisz, M. Gola, M. Kryca, W. Sobierajski. „Radiometryczny gęstościomierz OS-C dla osadzarki – zasada działania,” Konferencja Przeróbka Kopalni 2014, Szczyrk, 2014, pp. 41-52. [dysk optyczny CD-ROM]
6. S. Cierpisz, T. Cierpisz, S. Król, J. Joostberens, E. Piwowar. „Automatyczna regulacja procesu flotacji węgla w Zakładzie Wzbogacania Węgla Kopalni Sośnica.” *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, R. 37, nr 7, pp. 7-14, 1999.
7. S. Cierpisz, J. Joostberens. „Monitoring of coal separation in a jig using a radiometric density meter.” *Measurement*, vol. 88, pp. 147-152, 2016.
8. S. Cierpisz, J. Joostberens. „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, 2016, pp. 45-50.
9. C. Clarkson, D. Hornsby, D. Walker. „Automatic Flotation Control using On-Stream Ash Analysis.” *Coal Preparation*, vol. 12, pp. 41-64, 1993.
10. G.J. Lyman. „Review of jigging principles and Control.” *Coal Preparation*, vol. 11, pp. 41-72, 1992.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

dr inż. Jarosław Joostberens

Politechnika Śląska,
Wydział Górnictwa i Geologii
Katedra Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska
e-mail: jaroslaw.joostberens@polsl.pl

MODEL SYMULACYJNY GĘSTOŚCIOMIERZA RADIOMETRYCZNEGO

Streszczenie: *Gęstościomierze radiometryczne znajdują zastosowanie w układach monitoringu i sterowania różnych procesów technologicznych, w tym również procesów przeróbki węgla kamiennego takich jak: wzbogacanie w cieczy ciężkiej, wzbogacanie w osadzarce, flotacja węgla. Gęstościomierze te działają na zasadzie absorpcji promieniowania gamma. Głowica pomiarowa gęstościomierza składa się ze źródła promieniowania oraz detektora, zwykle w postaci licznika scyntylacyjnego. Sygnał z detektora promieniowania jest ciągiem impulsów, który jest sygnałem stochastycznym o rozkładzie czasowym Poissona. Impulsy te zliczane są często za pomocą licznika impulsów, stanowiącego rodzaj filtru dolnoprzepustowego. Zależność pomiędzy mierzoną średnią wartością gęstości ośrodka, a średnią częstością zliczanych impulsów ma teoretycznie charakter wykładniczy. W artykule przedstawiono model symulacyjny gęstościomierza radiometrycznego. Opisano metodę pomiarową oraz podano równania modelu gęstościomierza. Przedstawiono również przykładowe wyniki badań symulacyjnych w formie graficznej.*

Słowa kluczowe: *gęstościomierz radiometryczny, rozkład Poissona, licznik, cyfrowy filtr dolnoprzepustowy*

SIMULATION MODEL OF A RADIOMETRIC DENSITY METER

Abstract: *Radiometric density meters are widely used in the industry to monitor different technological processes also in coal preparation such as: Heavy-media separation, Jigging, Flotation. Operation of the radiometric density meters is based on the method of gamma radiation absorption. The measuring head of the radiometric density meter consists of a radiation source and a detector usually in the form of a scintillation counter. The output signal from the detector is sequence of pulses which is always a stochastic signal with Poisson distribution. These pulses are often counted by a counter being a kind of a low-pass digital filter. The relation between the measured medium density and the mean intensity of registered pulses is theoretically exponential. In the paper there has been presented a simulation model of the radiometric density meter. There have been described the measurement method and given densitometer model equations. Example simulation results have also been presented in a graphic form.*

Key words: *radiometric density meter, Poisson distribution, counter, low-pass digital filter*