ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: GÓRNICTWO z. 246 Nr kol. 1480

Jarosław JOOSTBERENS
Politechnika Śląska, Gliwice

ALGORYTMY AUTOMATYCZNEGO STEROWANIA PROCESEM FLOTACJI – BADANIA SYMULACYJNE

Streszczenie. W artykule opisano układ sterowania procesem flotacji w Zakładzie Wzbogacania Węgla Kopalni „Sośnica". Przedstawiono układ technologiczny obiektu flotacji oraz omówiono lokalne pętle automatycznej regulacji. Ponadto opisano układy pomiarowe poszczególnych parametrów, a także zanalizowano algorytmy sterowania poszczególnych wielkości. W artykule przedstawiono również wyniki badań symulacyjnych zamodelowanych układów: automatycznej stabilizacji poziomu cieczy w komorze flotownika oraz automatycznej stabilizacji natężenia przepływu powietrza do aeracji.

ALGORITHMS OF THE FLOTATION PROCESS CONTROL - COMPUTER SIMULATION

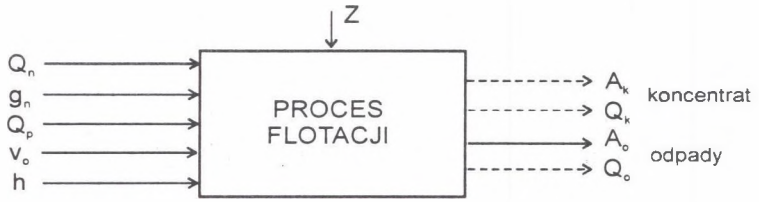
Summary. The coal flotation control system installed in the „Sośnica" mine is presented. The control algorithms applied in the loop of air flow stabilization and the loop of slurry level in flotation cells stabilization have been discussed. In the paper are presented results of simulation this local loops.

1. Wstęp

Flotacja należy do fizykochemicznych metod wzbogacania surowców mineralnych. W przypadku węgli kamiennych wzbogacanie metodą flotacji stosowane jest dla nadawy składającej się z ziaren mniejszych od 0,5 [mm] (max 1 [mm]) [3].

Z punktu widzenia automatyzowania procesu flotacja węgla jest wielowymiarowym, nieliniowym obiektem sterowania [3], w którym podstawowymi wielkościami wejściowymi są: natężenie przepływu nadawy – Q_n, koncentracja części stałych w nadawie – g_n, natężenie przepływu powietrza do aeracji – Q_p, poziom cieczy w komorach flotownika – h, natężenie przepływu odczynnika flotacyjnego – V_o.

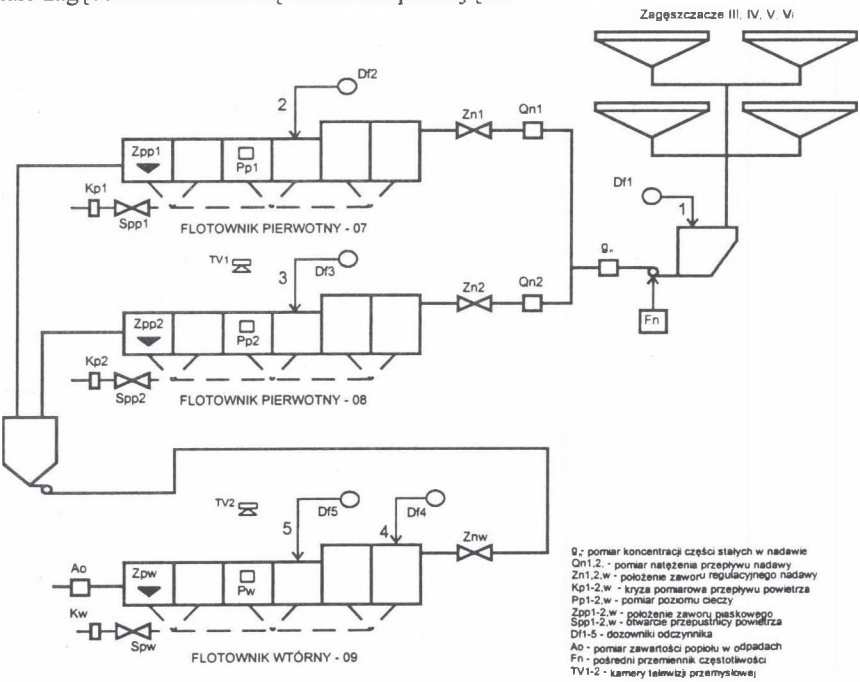
Wielkościami wyjściowymi procesu flotacji są: flotokoncentrat o zawartości popiołu A_k oraz odpady flotacyjne o zawartości popiołu A_o.



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

2. Układ technologiczny

W Zakładzie Wzbogacania Węgla Kopalni „Sośnica" zainstalowany został przez firmę Min–Tech układ sterowania procesem flotacji. Układ technologiczny obiektu przemysłowego przedstawia rys. 2. W układzie tym źródłem nadawy są zagęszczacze (III, IV, V, VI), do których kierowana jest woda obiegowa z obiektu cieczy ciężkiej o zagęszczeniu 50÷100 [g/l] (zagęszczacz IV) oraz woda obiegowa z obiektu osadzarek o zagęszczeniu 150÷200 [g/l] (zagęszczacze III, V, VI). Podstawowym źródłem nadawy jest zagęszczacz IV, natomiast pozostałe zagęszczacze stanowią źródło uzupełniające.



Rys.2. Układ technologiczny obiektu flotacji w Zakładzie Wzbogacania Węgla Kopalni „Sośnica"
Fig. 2. The flotation process in the „Sośnica" plant

Obiekt flotacji wyposażony jest w trzy flotowniki (IZ–12), przy czym dwa z nich pracują równolegle jako flotowniki pierwotne – 2007 i 2008, natomiast trzeci – flotownik wtórny 2009 połączony jest z nimi szeregowo. Łączone w zbiorniku wylewy z zagęszczaczy stanowią źródło nadawy dla flotowników pierwotnych, a ich odpady są ponownie poddawane procesowi wzbogacania we flotowniku wtórnym. Flotokoncentrat pompowany jest do rząpia i dalej do odwadniania na filtrach tarczowych, a odpady flotacyjne kierowane są do zagęszczacza odpadów nr VII. Podstawowe parametry średnie układu flotacji są następujące: natężenie przepływu nadawy $Q_n = 350 \div 450$ [m^3/h], koncentracja części stałych w nadawie $g_n = 70 \div 150$ [g/l], zawartość popiołu w odpadach flotacyjnych $A_o = 65 \div 85$ [%] [1].

3. Układ sterowania

Centralnym układem obsługującym urządzenia pomiarowe i wykonawcze jest sterownik Advantech/Mintech [1]. W komputerowym układzie sterowania pomiary poszczególnych wielkości realizowane są za pomocą następujących urządzeń pomiarowych:

- natężenie przepływu nadawy (Q_{n1}, Q_{n2}) – przepływomierze elektromagnetyczne DANFOSS,
- koncentracja części stałych w nadawie (g_n) – gęstościomierz izotopowy POLON,
- poziom cieczy w komorach flotownika (Pp1, Pp2, Pw) – poziomomierze membranowe zanurzeniowe,
- natężenie przepływu powietrza do aeracji – kryzy pomiarowe (Kp1, Kp2, Kw) z przetwornikami różnicy ciśnienia na sygnał elektryczny,
- zawartość popiołu w odpadach flotacyjnych (A_o) – popiołomierz optyczny MPOF.

Odczynniki flotacyjne podawane są za pomocą pięciu dozujących pompek membranowych (Df1-5) na czoło flotacji (do zbiornika pośredniego) i do środkowych części komór flotowników pierwotnych oraz na czoło i komorę środkową flotownika wtórnego [2]. Komputerowy układ sterowania umożliwia definiowanie zarówno ilości, jak i proporcji dozowanego odczynnika kierowanego na czoło flotacji i do środkowych części komór flotowników pierwotnych. Natomiast dozowanie odczynnika do flotownika wtórnego nie jest powiązane z układem sterowania. Całkowita ilość odczynnika flotacyjnego oraz proporcje jego dozowania definiowane są przez operatora. Istnieje możliwość automatycznego dozowania odczynnika w zależności od ilości części stałych w nadawie, jak również uzależnienie dawki odczynnika od wskazań popiołomierza optycznego odpadów flotacyjnych. Centralny układ (sterownik Advantech/Mintech) realizuje również wizualizację i raportowanie o przebiegu procesu flotacji [2]. Ze względu na usytuowanie flotowników 2008 i 2009 względem stanowiska operatora, układ sterowania wyposażono w dwie kamery przemysłowe. Dzięki temu operator na bieżąco może obserwować pianę flotacyjną powstającą w tych flotownikach.

Na obecnym etapie uruchomione są lokalne układy automatycznej stabilizacji takich parametrów, jak: poziom cieczy w komorze flotownika (h) oraz natężenie przepływu powierza do aeracji (Q_p). Parametry te regulowane są w każdym z trzech flotowników, przy czym o wielkości wartości zadanej danego parametru decyduje operator na podstawie między innymi aktualnych wskazań popiołomierza. We wszystkich lokalnych pętlach automatycznej

regulacji wprowadzono sterowanie z modulacją szerokości impulsu PWM. Ten sposób sterowania wynika z zastosowanych siłowników liniowych z napędem (silnikowym) elektrycznym [1]. Należy zauważyć, że operator ma możliwość wyboru trybu pracy. Może on podjąć decyzję o wyłączeniu pracy w „trybie automatycznym" i przejść na regulację ręczną dla dowolnego układu automatycznej stabilizacji. Dzięki wprowadzonym układom automatycznej stabilizacji oraz możliwości dostosowywania układu sterującego do panujących w danej chwili warunków praca operatora jest znacznie skuteczniejsza.

4. Stabilizacja poziomu cieczy w komorze flotownika

Komora flotownika jest zbiornikiem o objętości V, do którego doprowadzana jest nadawa o natężeniu Q_n. Dynamiczne własności zbiornika opisać można równaniem różniczkowym:

$$A \cdot \frac{dh}{dt} = \Delta Q(t), \tag{4.1}$$

gdzie: A – powierzchnia przekroju zbiornika,
$\Delta Q = Q_n(t) - Q_o(t)$ – różnica natężeń przepływów,
Q_o – natężenie przepływu odpadów flotacyjnych,
h – poziom cieczy w komorze flotownika.

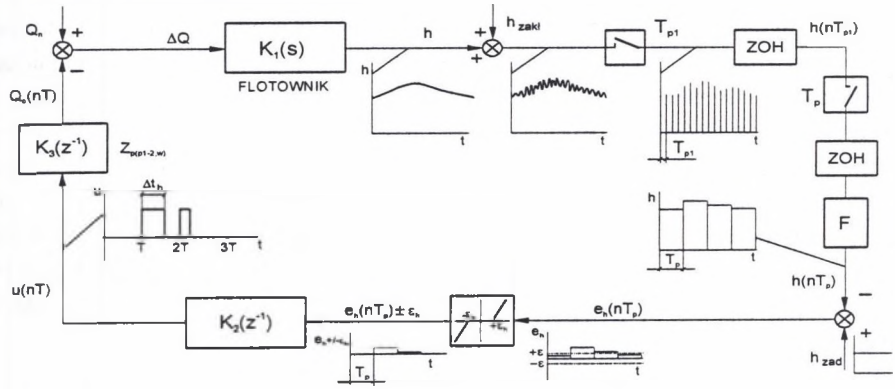
Przekształcając powyższe równanie ze względu na h otrzymuje się:

$$h = \frac{1}{A} \cdot \int_0^t (\Delta Q)\, dt \tag{4.2}$$

W związku z tym komora flotownika jest członem całkującym o transmitancji operatorowej równej:

$$K_1(s) = \frac{k_1}{s} \tag{4.3}$$

Schemat blokowy, zastosowanego w Zakładzie Wzbogacania Węgla kopalni „Sośnica", układu automatycznej stabilizacji poziomu cieczy w komorze flotownika, przedstawia rysunek 3.



Rys.3. Schemat blokowy układu stabilizacji poziomu cieczy w komorze flotownika, ZOH – ekstrapolator zerowego rzędu (Zero Order Hold)

Fig.3. Control loop of the slurry level in flotation cells stabilization

W przemysłowym układzie poziom cieczy w komorze flotownika h mierzony jest za pomocą poziomomierza membranowego zanurzeniowego. Sterownik odczytuje uzyskiwany sygnał w dyskretnych chwilach czasu $T_{pl} = 1$ [s]. Sygnał ten jest uśredniany w filtrze F za okres czasu $T_p = 5$ [s], a następnie porównywany jest z wartością zadaną definiowaną przez operatora. Na podstawie wyznaczonego sygnału błędu $e_h(nT_p)$ określa się czas trwania impulsu Δt_h sygnału wyjściowego u(nT), który steruje pracą liniowych siłowników elektrycznych sprzężonych z elementami wykonawczymi – zaworami piaskowymi.

Czas trwania impulsu obliczany jest zgodnie ze wzorem:

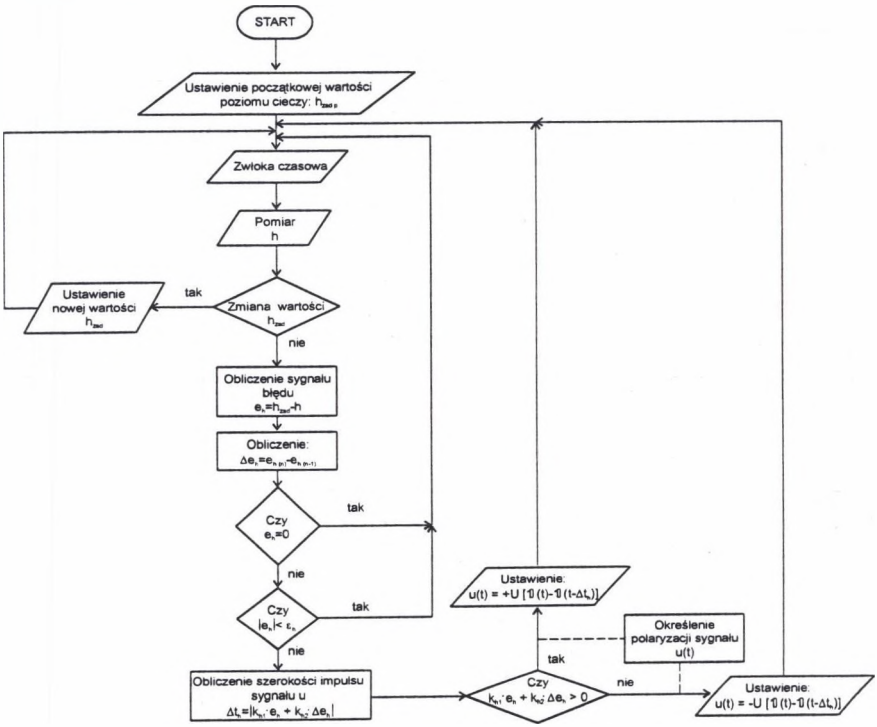
$$\Delta t_h = \left| k_{h1} \cdot e_h + k_{h2} \cdot \Delta e_h \right|, \tag{4.4}$$

gdzie: $e_h = (h_{zad} - h)$ – sygnał błędu,

$\Delta e_h = e_{h(n)} - e_{h(n-1)}$ – zmiana błędu,

k_{h1}, k_{h2} – współczynniki (wzmocnienia).

W rezultacie sygnałem, który powoduje wysterowanie napędu siłownika zaworu piaskowego, jest napięcie o stałej amplitudzie, ale o zmiennym czasie trwania Δt_h. O polaryzacji impulsu (±) sygnału wyjściowego u(nT) decyduje znak sumy $(k_{h1} \cdot e_h + k_{h2} \cdot \Delta e_h)$. Dla $k_{h1} \cdot e_h + k_{h2} \cdot \Delta e_h > 0$ $(k_{h1} \cdot e_h + k_{h2} \cdot \Delta e_h < 0)$ na wyjściu ustawiany jest sygnał o amplitudzie +U (-U) na czas Δt_h, co powoduje otwarcie (przymknięcie) zaworu w stosunku do jego położenia wyjściowego, przy czym następny sygnał u wystąpi po okresie T = 30 [s].



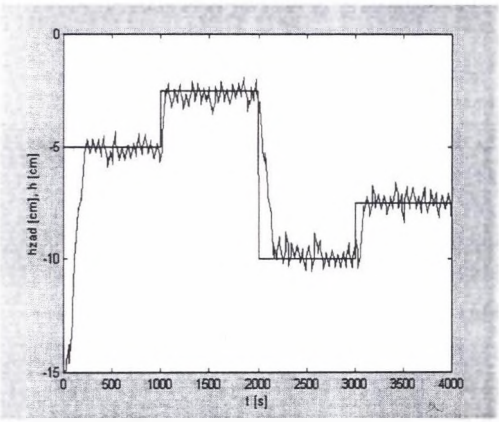
Rys. 4. Algorytm automatycznej regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika
Fig. 4. Algorithm of the slurry level in flotation cells stabilization

W rzeczywistości zastosowany regulator jest impulsowym regulatorem typu PD z dodatkową filtracją zakłóconego sygnału pomiarowego (strefa nieczułości ε_h). Przyjęty algorytm sterowania w układzie automatycznej regulacji poziomu h przedstawia rysunek 4.

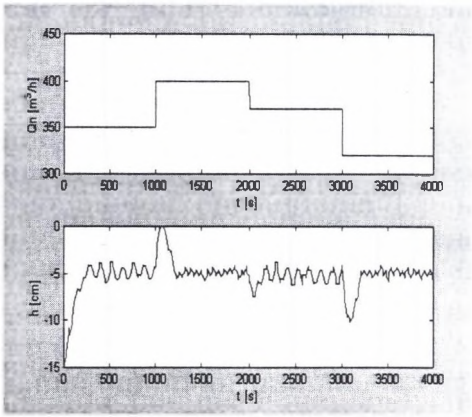
W celu zobrazowania, analizy i oceny pracy przemysłowego układu automatycznej stabilizacji poziomu cieczy w komorze flotownika zbudowano model symulacyjny. Badania symulacyjne przeprowadzono w programie Matlab 5.2 z wykorzystaniem pakietu Simulink. W pierwszym etapie badań symulacyjnych dokonano analizy stabilizacji poziomu cieczy w komorze flotownika przy zmianach poziomu h_{zad}, przy czym przyjęto, że poziom 0 [cm] oznacza przelew. Wyniki przedstawiono na rysunku 5.

W symulowanym układzie zadawano kolejno wartości poziomu h_{zad}: -5 [cm], -2,5 [cm], -10 [cm] i -7,5 [cm]. Układ, na skutek skokowej zmiany wartości zadanej, dąży do nowego poziomu i utrzymuje go, aż do chwili zdefiniowania nowej wartości, przy czym czas ustalania się T_u jest mniejszy od 250 [s]. Występujące fluktuacje poziomu wokół wartości zadanej wynikają z istniejących zakłóceń oraz z przyjętej metody sterowania.

Wyniki badań symulacyjnych przedstawione na rys. 5 odnoszą się do zmian wartości zadanej przy stałej wartości natężenia przepływu nadawy Q_n = const.



Rys.5. Przebieg wartości zadanej h_{zad} i poziomu cieczy h
Fig.5. Response of the control system to the step change of the level desired value



Rys.6. Stabilizacja poziomu cieczy w komorze flotownika przy zmianach natężenia przepływu nadawy Q_n
Fig.6. Response of the control system to the step change of the feed flow

Natężenie przepływu nadawy Q_n ulega pewnym wahaniom. Ponadto przewidywane uruchomienie okresowej stabilizacji natężenia przepływu ilości części stałych do flotowników pierwotnych związane będzie z okresowymi zmianami natężenia przepływu nadawy. W związku z tym układ automatycznej stabilizacji poziomu cieczy w komorze flotownika powinien być mało wrażliwy na skokowe zmiany natężenia przepływu nadawy. W drugim etapie badań symulacyjnych dokonano analizy wpływu skokowych zmian natężenia przepły-

wu nadawy Q_n na stabilizację poziomu cieczy w zamkniętym układzie regulacji. Układ odpowiadał na zmiany Q_n utrzymując poziom cieczy w granicach wartości zadanej (h_{zad} = -5 [cm]). Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rys 6.

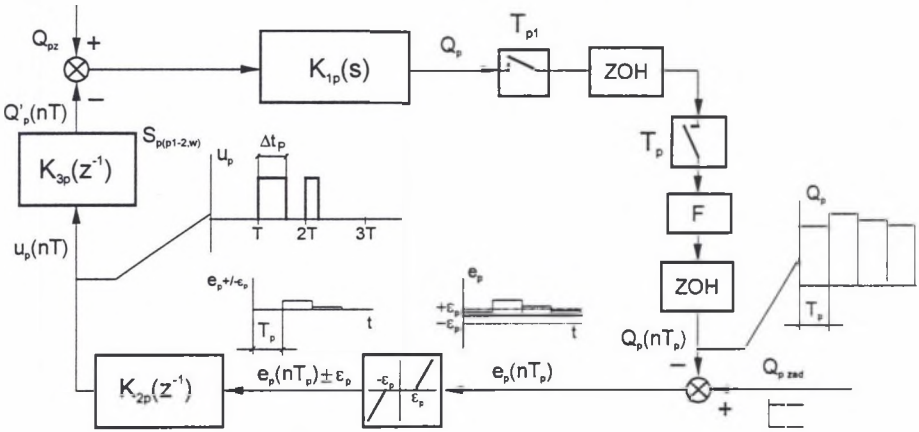
W procesie flotacji węgla poziom cieczy w komorze flotownika powinien być stabilizowany na poziomie gwarantującym poprawność prowadzenia samego procesu. Utrzymanie określonego poziomu cieczy w komorze flotownika przemysłowego jest trudne ze względu na znaczne zakłócenia. Omówiony układ automatycznej stabilizacji poziomu cieczy w komorze flotownika utrzymuje poziom h w pobliżu wartości zadanej i wykazuje małą wrażliwość na zmiany natężenia przepływu nadawy.

5. Stabilizacja natężenia przepływu powietrza do aeracji

Duży wpływ na efekt flotacji obok natężenia przepływu odczynnika flotacyjnego i poziomu cieczy w komorze flotownika ma natężenie przepływu powietrza do aeracji Q_p. Zainstalowany na obiekcie flotacji Kopalni „Sośnica " układ sterowania realizuje automatyczną stabilizację Q_p. W tej pętli regulacji zastosowano algorytm impulsowego regulatora typu P, w którym czas załączania napędu przepustnicy zależy od sygnału błędu $e_p(nT_p)$ (rys. 7).

$$\Delta t_p = \left| k_p \cdot e_p \right|. \tag{5.1}$$

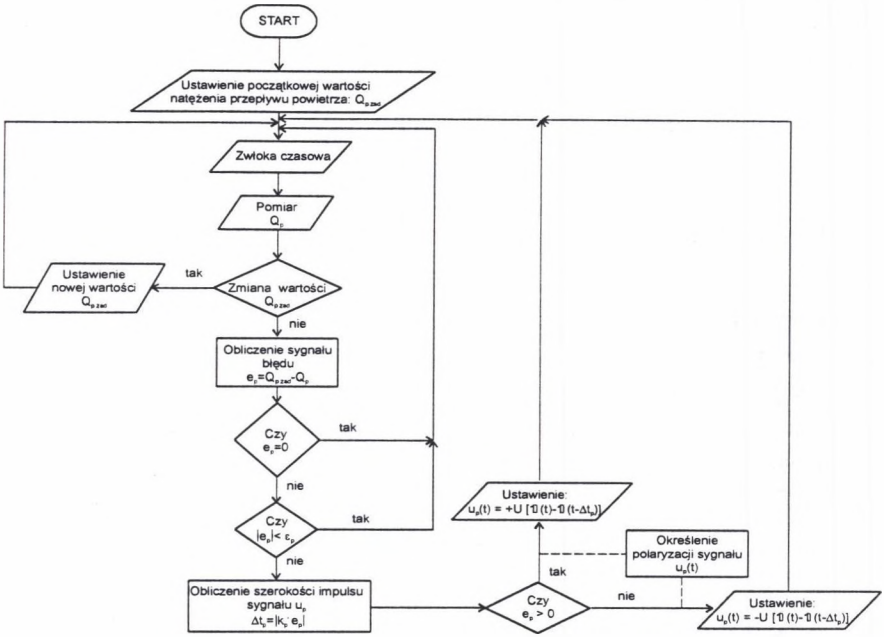
gdzie: k_p – wzmocnienie,
$e_p = (Q_{p\,zad} - Q_p)$ – sygnał błędu.



Rys. 7. Schemat blokowy układu stabilizacji natężenia przepływu powietrza do aeracji
Fig.7. Control loop of air flow stabilization

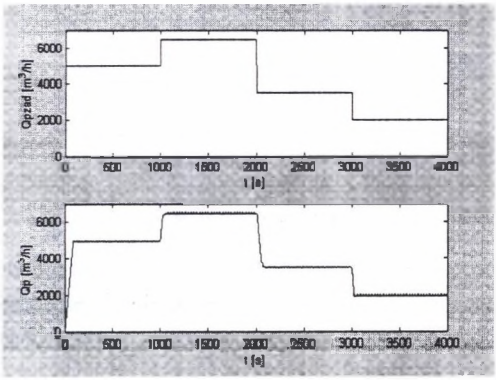
W układzie stabilizacji Q_p do pomiaru natężenia przepływu powietrza do aeracji zastosowano kryzy pomiarowe z przetwornikami różnicy ciśnienia na sygnał elektryczny. Pomiarowe sygnały elektryczne podawane są do sterownika. Sygnał błędu $e_p(nT_p)$, określony

w wyniku porównania war-tości zadanej $Q_{p\ zad}$ z uśrednionym za okres czasu T_p sygnałem $Q_p(nT_p)$, określa szerokość impulsu i znak sygnału wyjściowego $u_p(nT)$, który steruje położeniem przepustnic, czyli w konsekwencji realizuje zmianę wartości natężenia przepływu powietrza do aeracji. Algorytm sterowania przedstawiono na rysunku 8.



Rys.8. Algorytm automatycznej stabilizacji natężenia przepływu powietrza do aeracji
Fig.8. Algorithm of air flow stabilization

Układ automatycznej stabilizacji natężenia przepływu powietrza do aeracji również zamodelowano w programie Simulink Matlab 5.2. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rysunku 9. Układ reagował na zmiany wartości zadanej natężenia przepływu powietrza osiągając zadaną wartość i utrzymując Q_p na wymaganym poziomie.



Rys. 9. Przebieg wartości zadanej $Q_{p\ zad}$ i natężenia przepływu powietrza do aeracji Q_p
Fig. 9. Response of the control system to the step change of the air flow desired value

6. Wnioski

1. Zainstalowany przez firmę Min-Tech układ sterowania procesem flotacji charakteryzuje duża elastyczność, co pozwala szybko dostosować go do nowych warunków pracy w przypadku modernizacji obiektu zarówno od strony technologicznej, jak i pomiarowej.
2. Dzięki wprowadzonym układom automatycznej stabilizacji takich parametrów, jak: poziom cieczy w komorze flotownika, natężenie przepływu powietrza do aeracji praca operatora jest skuteczniejsza. Może on dokonywać korekt wartości zadanych w zależności od zmian parametrów nadawy, wskazań popiołomierza itp.
3. W lokalnych układach stabilizacji parametrów: h i Q_p zastosowano algorytmy sterowania w postaci procedur sterowania z modulacją szerokości impulsu PWM.
4. Zamodelowane w programie Simulink Matlab 5.2 przemysłowe układy regulacji h i Q_p stabilizują sygnał regulowany na zadawanym poziomie i wykazują małą wrażliwość na zakłócenia i zmiany sygnałów zasilających.

LITERATURA

1. Cierpisz S., Cierpisz T., Joostberens J., Król S., Piwowar E.: Automatyczna regulacja procesu flotacji węgla w Zakładzie Wzbogacania Węgla kopalni „Sośnica", MIAG, Nr 7, 1999, str. 7-14
2. Cierpisz S., Cierpisz T., Rotter J., Głowacki D., Pazur B.: Systemy monitoringu i sterowania w zakładzie wzbogacania węgla i obiektach powierzchniowych KWK „Sośnica", VI APPK, Szczyrk 2000, str. 121-142
3. Cierpisz S., Kalinowski K., Walaszek – Babiszewska A.: Zależność zapopielenia koncentratu od parametrów regulacyjnych w procesie flotacji węgla, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskej, s. Górnictwo z. 156, 1987
4. Łuszczkiewicz A., Mikołajczuk R.: Flotacja, Internet 1999, http:// www.ig.pwr.wroc.pl

Recenzent: Dr hab.inż. Anna Walaszek-Babiszewska
Prof. Politechniki Zielonogórskiej

Abstract

The coal flotation control system installed in the „Sośnica" mine is presented. The technology of flotation object, the loops automatic control and the monitoring system of the coal flotation process have been discussed. The control algorithms of the air flow stabilization and the slurry level stabilization in the flotation cells are also described. The algorithms use the pulses width modulation procedures – the time of pulse duration depends on the value of the error of the control. In the paper are also presented results of simulation of the above local control loops.