

Stanisław CIERPISZ, Jarosław JOOSTBERENS
Politechnika Śląska, Gliwice

STABILIZACJA POZIOMU CIECZY W KOMORZE FLOTOWNIKA

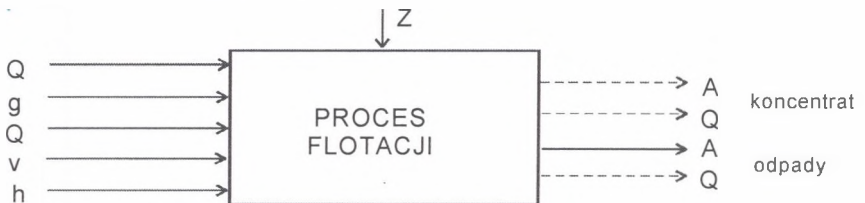
Streszczenie. W artykule omówiono układ automatycznej regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika, który realizuje algorytm cyklicznej korekty wartości zadanej poziomu cieczy w celu zwiększania zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych. Przedstawiono również wyniki badań symulacyjnych proponowanego układu regulacji ekstremalnej.

STABILISATION OF THE SLURRY LEVEL IN THE COAL FLOTATION CELL

Summary. In the paper are presented results of simulation analysis of the control system automatically searching for the optimum desired value of the slurry level in the flotation machine.

1. Wstęp

Z punktu widzenia automatyzowania procesu flotacja węgla kamiennego jest wielowymiarowym nieliniowym obiektem sterowania. Podstawowymi sygnałami 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 . Natomiast wielkości wyjściowe procesu flotacji to: flotokonzentrat o zawartości popiołu A_k i natężeniu przepływu Q_k oraz odpady flotacyjne o zapopieleniu A_o i natężeniu przepływu Q_o .



Rys. 1. Podstawowe wielkości wejściowe i wyjściowe procesu flotacji, Z – zakłócenie

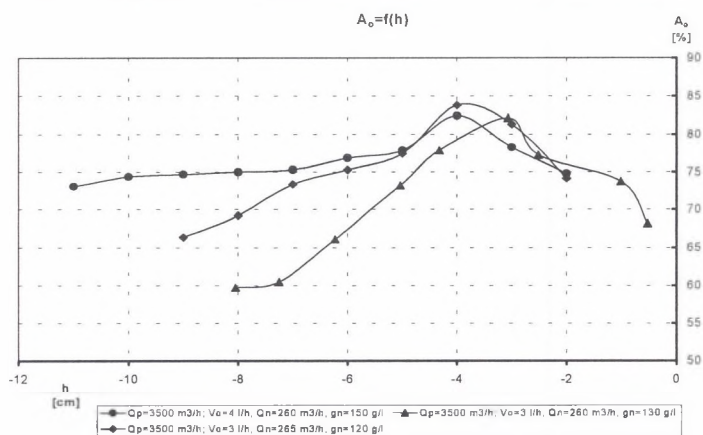
Fig. 1. Basic input - output signals in the coal flotation process, Z - disturbances

Stan prac badawczych obejmujących problematykę identyfikacji procesu flotacji węgla jest niezwykle skromny [3,4]. Z tego powodu przeprowadzono badania na obiekcie przemysłowym flotacji w Zakładzie Wzbogacania Węgla kopalni „Sośnica”, których celem było wyznaczenie charakterystyk statycznych flotownika przemysłowego [2]. Przez charakterystyki statyczne należy rozumieć zależność między sygnałem wyjściowym a sygnałem wejściowym w stanach ustalonych.

2. Zależność zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych od poziomu cieczy w korze flotownika

W ramach przeprowadzonych badań identyfikacyjnych określono m. in. charakterystyki statyczne opisujące zależność zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych od poziomu cieczy w komorze flotownika. W Zakładzie Przeróbki Węgla kopalni „Sośnica” zainstalowany został przez firmę Min-Tech układ sterowania procesem flotacji. W czasie gdy przeprowadzano badania, układ technologiczny wzbogacania w procesie flotacji składał się z dwóch szeregowo połączonych flotowników: pierwotnego 2007 (IZ-12) i wtórnego 2008 (IZ-12). Charakterystyki statyczne rozumiane jako zależność zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych od poziomu cieczy w komorze flotownika określono dla *flotownika wtórnego*. W zainstalowanym układzie sterowania, urządzenia pomiarowe i wykonawcze obsługiwane są przez jednostkę centralną – sterownik Advantech/Mintech. Pomiary poszczególnych wielkości realizowane są za pomocą następujących urządzeń pomiarowych:

- natężenie przepływu nadawy (Q_{n1} , Q_{n2}) – przepływomierze elektromagnetyczne ENCO,
- koncentracja części stałych w nadawie – gęstościomierz piezometryczny,
- poziom cieczy w komorach flotownika – poziomomierze membranowe zanurzeniowe,
- natężenie przepływu powietrza do aeracji mętów – kryzy pomiarowe z przetwornikami różnicy ciśnienia na sygnał elektryczny,
- zawartość popiołu w odpadach flotacyjnych – popiolomierz optyczny MPOF.



Rys. 2. Zależność $A_o=f(h)$

Fig. 2. Relation between ash content in tailings A_o and the slurry level h

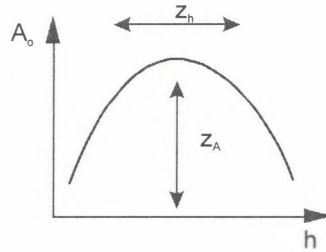
Odczynniki flotacyjne podawano za pomocą trzech dozujących pompki membranowych na czoło flotacji i do środkowych części komór flotowników.

Dla określenia zależności $A_o = f(h)$ przy $Q_p = \text{const}$ i $V_o = \text{const}$ zadawano kolejno wartości poziomu cieczy h (sygnał wejściowy) i odczytywano A_o (sygnał wyjściowy), natomiast Q_p i V_o utrzymywano na stałych poziomach.

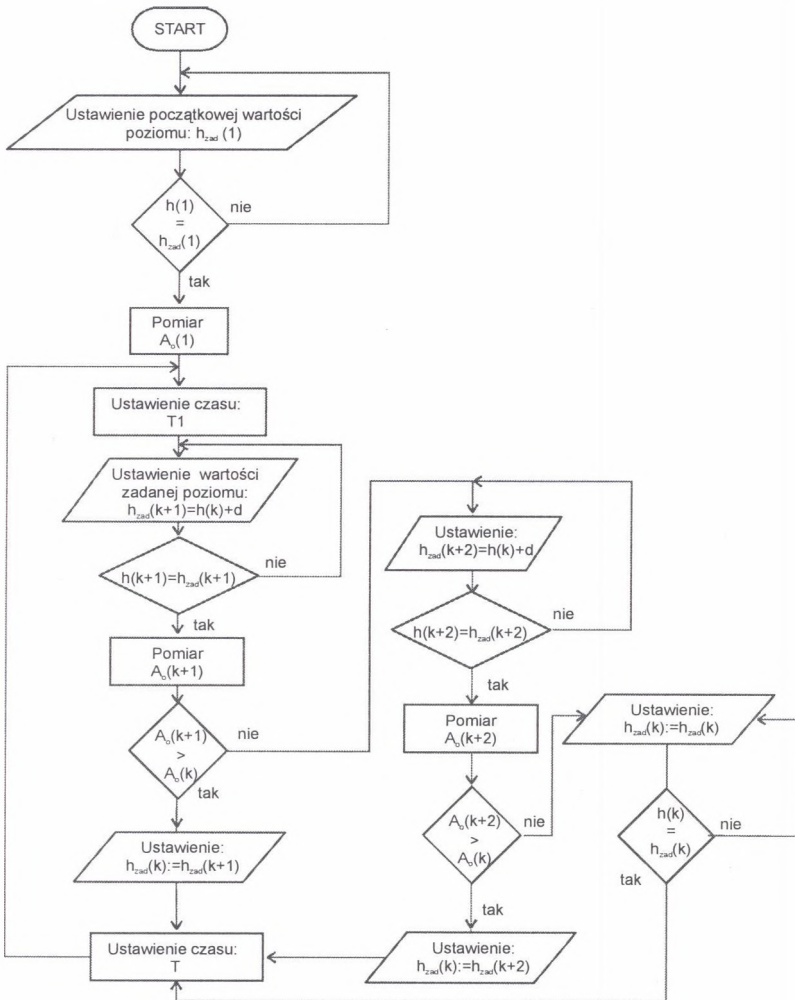
Na rys. 2 przedstawiono charakterystyki statyczne flotownika przedstawiające wpływ poziomu cieczy w komorach flotownika na wartość popiołu w odpadach. Na osi odciętych wyskalowano wartość poziomu cieczy w komorach flotownika w centymetrach, przy czym wartość 0 [cm] oznacza przelew. Z przedstawionych zależności $A_o = f(h)$ wynika, że poziom cieczy w komorach flotownika ma znaczny wpływ na zawartość popiołu w odpadach. Każda z uzyskanych charakterystyk posiada pewien przedział od h_1 do h_2 , dla którego zaobserwować można znaczny wzrost A_o . W granicach tych przedziałów zawierają się wartości maksymalne, czyli takie wartości poziomu h , dla których zawartość popiołu w odpadach jest największa. Ponadto należy zauważyć, że dla wartości poziomu bliskich przelewowi zawartość popiołu w odpadach w sposób istotny maleje.

3. Algorytm sterowania poziomem cieczy w komorze flotownika

Ekstremalny przebieg charakterystyk $A_o = f(h)$ nasuwa zmianę koncepcji sterowania poziomem cieczy w komorze flotownika. Konwencjonalne układy regulacji automatycznej poziomu cieczy w komorze flotownika są w rzeczywistości układami automatycznej stabilizacji poziomu h , w których decyzję o zmianie wartości zadanej poziomu podejmuje operator. Proponowany sposób automatycznego sterowania opierający się na poszukiwaniu optymalnej wartości zadanej poziomu – h_{zad} , ma na celu dobrać nową wartość zadaną poziomu cieczy w komorze flotownika tak, aby efektem tej zmiany było zwiększenie zawartości popiołu w odpadach. Algorytm automatycznego sterowania jest następujący: w pierwszej kolejności następuje zwiększenie wartości zadanej poziomu o stałą wartość d (przyjęto $d = 1$ cm) w stosunku do wartości początkowej $h_{\text{zad}}(k)$, czyli $h_{\text{zad}}(k+1) = h_{\text{zad}}(k) + d$. W dalszej kolejności następuje oczekiwanie na odpowiedź układu, tj. ustalenie się wartości popiołu w odpadach – $A_o(k+1)$. Jeżeli wartość $A_o(k+1)$ będzie większa od zawartości popiołu w odpadach, jaka występowała dla początkowego poziomu cieczy w komorze – $h_{\text{zad}}(k)$, wówczas układ sterujący ustawi wartość zadaną poziomu $h_{\text{zad}}(k+1)$ jako wartość obowiązującą do następnej korekcji, czyli na czas pracy T . W przeciwnym razie zadawana jest nowa wartość poziomu cieczy $h_{\text{zad}}(k+2) = h_{\text{zad}}(k) - d$. Gdy w odpowiedzi na zadanie wartości $h_{\text{zad}}(k+2)$ układ zareaguje wzrostem zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych, wtedy spowoduje to zmianę sygnału sterującego i ustawiona zostanie wartość zadana $h_{\text{zad}}(k+2)$, która obowiązywać będzie do następnej korekcji – $h_{\text{zad}}(k+2) := h_{\text{zad}}(k)$. W przeciwnym razie układ sterujący powraca do początkowej wartości zadanej poziomu, czyli ustawiana jest wartość $h_{\text{zad}}(k)$. Wartość „ d ”, o jaką następuje zmiana wartości zadanej poziomu, ma niebagatelny wpływ na wyniki automatycznej regulacji. Zbyt mała wartość zmniejszy co prawda wielkość strat związanych ze sterowaniem, ale pożądany wzrost A_o może być niewystarczający, dodatkowo wartość maksymalna, ze względu na zbyt długi czas dochodzenia układu do ekstremum, może się okazać nieosiągalna. Natomiast przyjęcie zbyt dużej wartości „ d ” może doprowadzić do generowania



Rys.3. Zmiany charakterystyki statycznej obiektu ekstremalnego: Z_h – zmiany poziome, Z_A – zmiany pionowe
 Fig.3. Variations of a static characteristic of an extreme object



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

nadmierznych strat związanych ze sterowaniem, a także może uniemożliwić osiągnięcie przez układ wartości ekstremalnej ze względu na zbyt duże zmiany wartości zadanej h_{zad} . W proponowanym algorytmie wielkość zmian h_{zad} przyjęto na poziomie 1 [cm], czyli $d = 1$ [cm]. Proponowany algorytm sterowania sprowadza się do cyklicznej korekcji poziomu cieczy w komorze flotownika w ten sposób, aby zmiana wartości zadanej poziomu niosła za sobą wzrost zawartości popiołu w odpadach. Przyjęcie takiego algorytmu wiąże się z tym, że punkt ekstremalny ulega przesuwaniu zarówno w poziomie, jak i w pionie (rys.3). Widoczne jest to na przedstawionych na rysunku 2 charakterystykach statycznych $A_0 = f(h)$. Zmiany położenia charakterystyk związane są ze zmianami warunków pracy, bowiem proces flotacji podlega m. in. losowym zaburzeniom zmieniającej się nadawy [2] – głównie koncentracji części stałych w nadawie.

Na rysunku 4 przedstawiono algorytm automatycznego regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika z korekcją wartości zadanej.

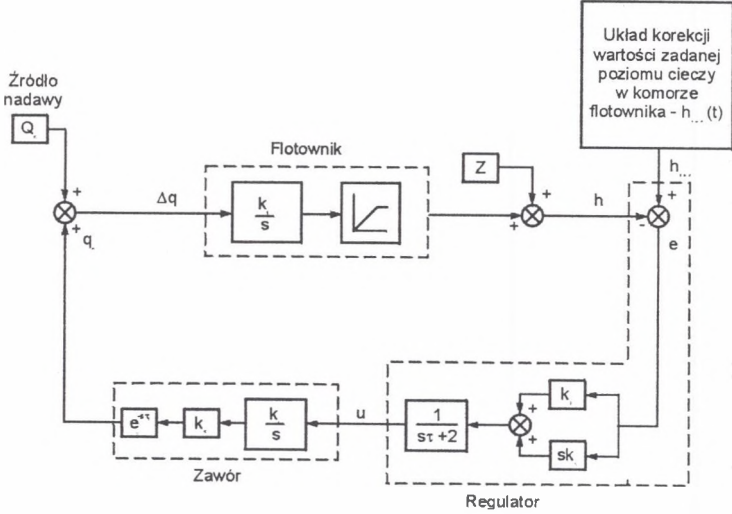
Proponowana metoda automatycznej regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika jest słuszna, przy założeniu że czas korekcji T_1 , podczas którego odbywa się poszukiwanie nowej wartości zadanej h_{zad} , powinien być dostosowany do dynamiki zmian procesu flotacji. Ponadto dla poprawnej pracy układu należy przyjąć warunek, że czas pracy T jest większy aniżeli czas korekcji T_1 , czyli $T > T_1$.

Wadą tej metody są straty powstające w wyniku ustawiania (podczas czasu korekcji) nietrafionych wartości poziomu. Są to straty związane z przyjętą metodą sterowania. Ich wielkość związana jest bezpośrednio z czasem korekcji T_1 , a także wartością stałej „ d ” i są one tym mniejsze, im czas T_1 jest krótszy oraz stała d jest mniejsza. Wynika stąd, że czas korekcji T_1 powinien być możliwie krótki, tak aby straty związane ze sterowaniem były jak najmniejsze. Z drugiej strony czas korekcji T_1 powinien być na tyle długi, aby na wymuszoną zmianę wartości zadanej układ zdążył odpowiedzieć.

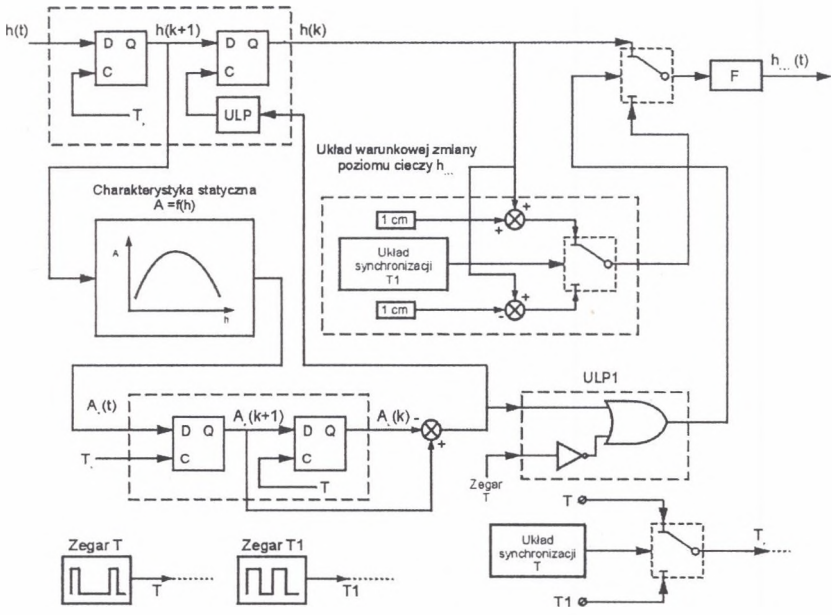
4. Model układu automatycznej regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika

Model układu regulacji ekstremalnej poziomu cieczy w komorze flotownika z korekcją wartości zadanej poziomu przedstawia rysunek 5.

W przedstawionym na rys. 5 schemacie układu regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika sygnałem sterującym jest wartość zadana poziomu cieczy $h_{zad}(t)$. Sygnał ten ulega zmianom co okres czasu T , a jego wartość zależy od wartości popiołu w odpadach flotacyjnych. Wielkością regulowaną jest poziom cieczy $h(t)$. Sygnał błędu $e(t)$ jest wynikiem porównania wartości zadanej z aktualnym poziomem cieczy: $e(t) = h_{zad}(t) - h(t)$. Sygnał błędu podawany jest na wejście regulatora typu PD. Elementem wykonawczym jest zawór piaskowy, który na obiekcie rzeczywistym sytuowany jest na odpływie maszyny flotacyjnej. Wielkość sygnału błędu $e(t)$ decyduje o położeniu zaworu, czyli o wartości natężenia przepływu odpadów flotacyjnych Q_0 . W związku z tym wartość poziomu w komorze flotacyjnej związana jest z różnicą natężenia przepływu nadawy i natężenia przepływu odpadów flotacyjnych, przy czym przyjęto, że wartość natężenia przepływu nadawy ma wartość stałą w czasie ($Q_n = \text{const}$), zatem różnica natężeń przepływów wynosi: $\Delta q(t) = Q_n - q_0(t)$. Różnica natężeń przepływów stanowi sygnał wejściowy komory flotownika, która z punktu widzenia poziomu cieczy stanowi człon całkujący z ograniczeniem. Na rys. 5 każdy z elementów zamkniętego układu sterowania został przedstawiony w postaci odpowiednich transmitancji.



Rys. 5. Model układu automatycznej regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika: Z – sygnał zakłócający
 Fig.5. The model of level control system in the flotation cell



Rys. 6. Model układu korekcji wartości zadanej poziomu cieczy w komorze flotownika: ULP, ULP1 – układy logicznego przełączania

Fig.6. The model of the level desired value automatic correction: ULP, ULP1 - modules of the logic switching

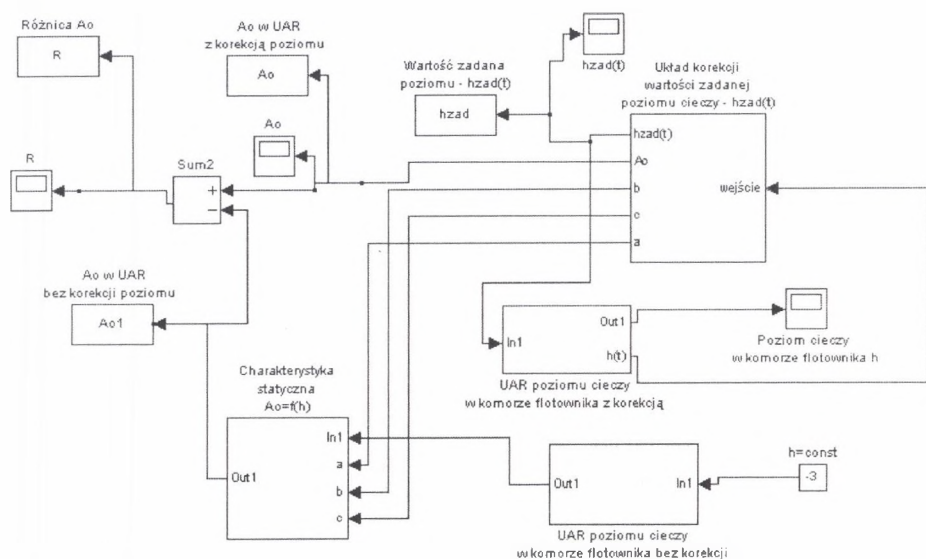
Blok korekcji wartości zadanej poziomu cieczy w komorze flotownika jest układem, który decyduje o wielkości wartości zadanej poziomu cieczy w komorze flotownika w danej chwili czasu. Jego strukturę przedstawia rysunek 6.

Układ korekcji wartości zadanej poziomu cieczy w komorze flotownika jest elementem realizującym algorytm sterowania przedstawiony na rys. 4. Układ ten składa się z elementów pamięci umożliwiających odczytywanie i zapamiętywanie wartości h i A_o , układu warunkowej zmiany poziomu cieczy, układów logicznego przełączania ULP, ULP1 oraz włączonego na wyjście filtru, którego zadaniem jest tłumienie zakłóceń powstałych w wyniku przełączeń. Dodatkowo do układu wprowadzono model charakterystyki statycznej, której kształt i położenie ulega zmianom w czasie. Jako charakterystykę statyczną w modelu symulacyjnym przyjęto równanie postaci: $A_o(t) = a \cdot h^2 + b \cdot h + c$, gdzie $a < 0$, $b > 0$.

W modelu symulacyjnym położenie kluczy logicznych zależy od sygnału sterującego z układów synchronizacji lub z układu logicznego przełączania.

5. Wyniki badań symulacyjnych

Badania symulacyjne przeprowadzono w programie Matlab 5.2 z wykorzystaniem pakietu Simulink (rys. 7).



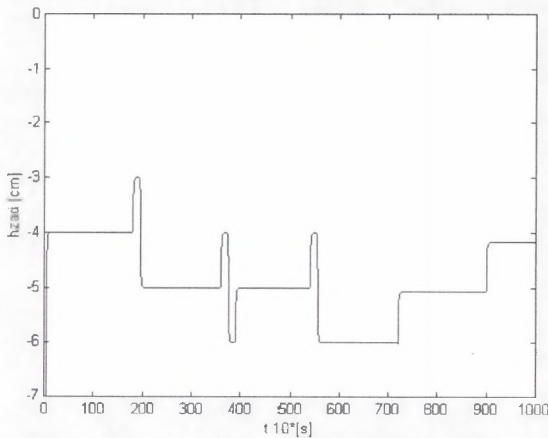
Rys. 7. Model symulacyjny w programie Simulink Matlab 5.2

Fig.7. Simulation model of the extreme control system (Simulink Matlab 5.2)

W celu porównania efektów proponowanego układu automatycznej regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika z korekcją wartości zadanej h_{zad} z konwencjonalnymi układami stabilizacji poziomu cieczy h przeprowadzono równoległe symulacje komputerowe obu wspomnianych układów sterowania (rys. 7), przy czym rejestracji poddano zawartość popiołu w odpadach flotacyjnych dla układu regulacji z korekcją (A_o) i bez korekcji (A_o1) wartości

zadanej poziomu. Dodatkowo kontrolowano również różnicę zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych $R = A_o - A_{o1}$.

W modelu charakterystyki statycznej $A_o = f(h)$ zaprogramowano losowe zmiany położenia i kształtu charakterystyk w czasie dłuższym niż czas pracy T . Na rysunku 8 i 9 przedstawiono kolejno przebieg wartości zadanej poziomu cieczy w komorze flotownika $h_{zad}(t)$ oraz poziomu cieczy w komorze flotownika $h(t)$. Na wykresach tych poziom cieczy wyskalowany jest w centymetrach, przy czym 0 [cm] oznacza przelew. Z kolei rysunki 10 i 11 obrazują zawartość popiołu w odpadach flotacyjnych dla układu z korekcją wartości zadanej i dla układu bez korekcji wartości zadanej. Analizując uzyskane przebiegi można stwierdzić, że układ regulacji stabilizował poziom $h(t)$ poprawnie odpowiadając stosunkowo szybko na zmiany wartości zadanej $h_{zad}(t)$. Na początku okresu symulacji po ustaleniu się w UAR poziomu cieczy w komorze flotownika z korekcją wartości zadanej nastąpiła pierwsza zmiana wartości zadanej, której skutkiem był wzrost poziomu cieczy w komorze. Zmiana ta spowodowała obniżenie zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych (strata na sterowanie). Stan taki wymusił ponowną korekcję h_{zad} , czego konsekwencją było obniżenie wartości zadanej poziomu, co przyniosło zamierzony efekt w postaci wzrostu zawartości popiołu w odpadach. W związku z tym obniżona wartość h_{zad} została utrzymana do czasu ponownej korekty. Kolejne uaktywnienie się układu zadającego po czasie pracy T nie przyniosło zamierzonego efektu zarówno dla zwiększonej, jak i zmniejszonej wartości h_{zad} . Układ zatem dotarł w okolice wartości ekstremalnej danej charakterystyki $A_o = f(h)$. Pod koniec czasu symulacji wzrost zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych odbywał się przy wzroście wartości h_{zad} . Reakcją układu było więc utrzymanie zwiększonej wartości zadanej poziomu cieczy jako obowiązującej do czasu ponownej korekcji.

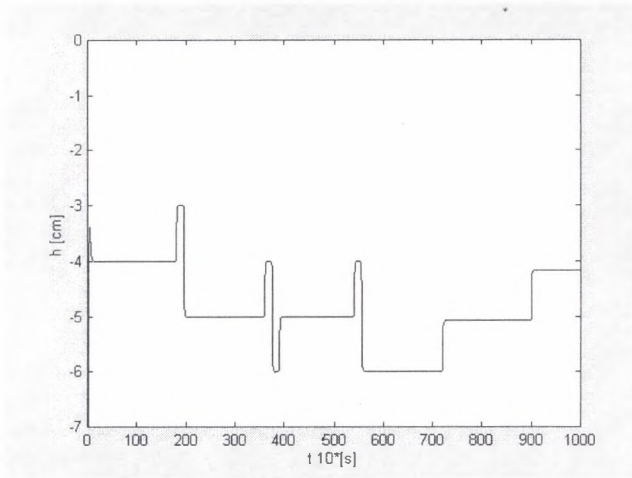


Rys. 8. Przebieg wartości zadanej poziomu cieczy w UAR z korekcją
 Fig. 8. Changes of the slurry level desired value in the extreme control system

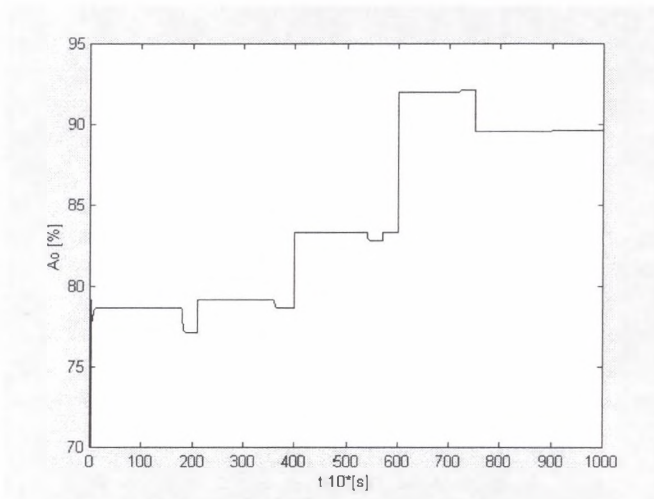
Na rysunku 12 przedstawiono różnicę zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych dla obu symulowanych układów sterowania: z korekcją i bez korekcji wartości zadanej.

Jak widać na rys. 11, porównanie dwóch metod regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika wypada na korzyść UAR z korekcją wartości zadanej poziomu. Zawartość popiołu nad poziomem zero oznacza wzrost A_o w układzie z korekcją w stosunku do układu bez korekcji wartości zadanej poziomu. Co prawda w końcowym czasie symulacji różnica zawarto-

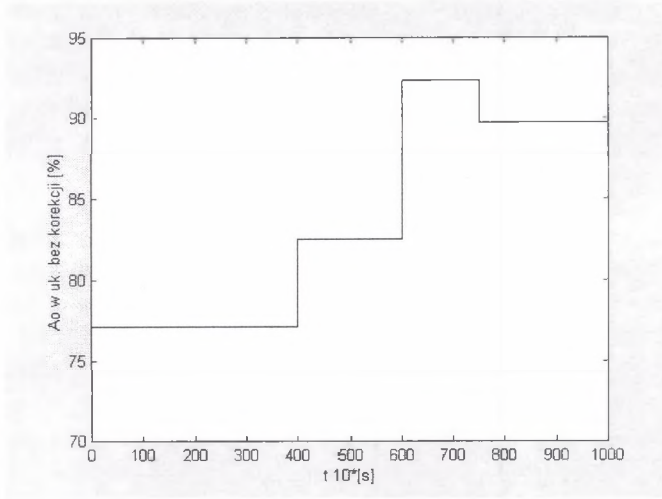
ści popiołu w odpadach ma wartość ujemną, ale widać, że jest ona relatywnie niska do wzrostu A_o w pozostałym czasie symulacji. Poza tym zauważyć można, że wartość ta systematycznie zdąża do wartości zerowej, czyli do wyrównania wartości A_o . Stosunkowo długi czas wzrostu zawartości popiołu w odpadach w UAR z korekcją podczas końcowego etapu symulacji wiąże się ze zmianą charakterystyki statycznej na model o niewielkim nachyleniu ramion paraboli i wartości maksymalnej przesuniętej względem osi odciętych w prawo w porównaniu do poprzedniej charakterystyki $A_o = f(h)$.



Rys. 9. Przebieg wartości poziomu cieczy w komorze flotownika w UAR z korekcją
Fig 9. Changes of the slurry level in the extreme control system

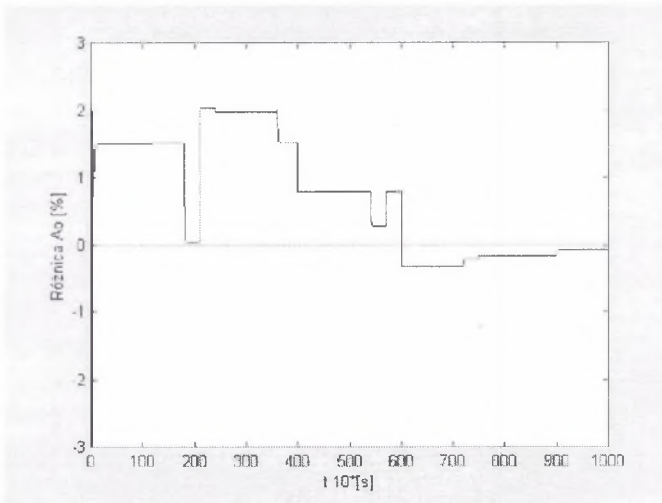


Rys. 10. Przebieg zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych w UAR z korekcją wartości zadanej poziomu cieczy
Fig 10. Changes of the ash in tailings in the control system with correction of the level desired value



Rys. 11. Przebieg zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych w UAR bez korekcji wartości zadanej poziomu cieczy

Fig. 11. Changes of the ash in tailings in the control system without correction



Rys. 12. Przebieg różnicy zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych w UAR z korekcją i bez korekcji wartości zadanej poziomu cieczy w komorze flotownika

Fig. 12. Difference between ash contents in tailings in the extreme and conventional control systems

Oceniając proponowany układ automatycznej regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika z korekcją wartości zadanej pod względem zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych, należy stwierdzić, że przy stałości pozostałych sygnałów wejściowych procesu flotacji węgla (Q_p , V_o , Q_n , g_n) uzyskuje się większą zawartość popiołu w odpadach aniżeli w konwencjonalnych układach stabilizacji poziomu cieczy w komorze flotownika. Oznacza to, że

omawiany układ regulacji ekstremalnej umożliwia prowadzenie procesu flotacji z mniejszymi stratami węgla, albo przy zmniejszonej ilości dozowanego odczynnika flotacyjnego (minimalizacja odczynnika flotacyjnego).

6. Wnioski

Jednym z zadań prowadzenia procesu flotacji jest uzyskanie odpowiednio dużej zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych. Z tego punktu widzenia opracowany układ automatycznej regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika, w którym okresowej korekcji podlega wartość zadana poziomu, należy ocenić pozytywnie. Przedstawione w artykule wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych w programie Simulink Matlab 5.2 pozwalają sformułować kilka wniosków:

1. Układ poprawnie realizuje regulację poziomu cieczy w komorze flotownika stabilizując wartość h na poziomie aktualnie zadawanej wartości h_{zad} .
2. Przyjęty algorytm sterowania umożliwia regulację ekstremalną, w której korekcja wartości zadanej poziomu cieczy pociąga za sobą wzrost zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych przy założeniu stałości pozostałych sygnałów wejściowych procesu flotacji.
3. W układzie regulacji z korekcją wartości zadanej poziomu cieczy średnia zawartość popiołu w odpadach flotacyjnych jest większa w stosunku do średniej zawartości popiołu w odpadach uzyskiwanej w konwencjonalnych układach stabilizacji poziomu cieczy.
4. Straty związane z przyjętym sposobem sterowania są znacznie mniejsze w stosunku do uzyskiwanych efektów.
5. Proponowany układ regulacji poziomu cieczy w komorze flotownika z korekcją wartości zadanej poziomu umożliwia pracę układu technologicznego z mniejszymi stratami węgla w odpadach flotacyjnych lub przy zmniejszonej ilości dozowanego odczynnika flotacyjnego, co z punktu widzenia ekonomicznego jest pożądane.

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., Joostberens J.: Charakterystyki statyczne flotownika, VI Konferencja APPK, Szczyrk, 12-13 maja 2000, str. 211+220.
3. Cierpisz S., Kalinowski K., Walaszek – Babiszewska A.: Zależność zapopielenia koncentratu od parametrów regulacyjnych w procesie flotacji węgla, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Górnictwo z. 156, Gliwice 1987.
4. Krasucki F., Kalinowski K.: Sterowanie procesu flotacji, Seminarium Elektryfikacji i Automatykacji Kopalń, Skrypt uczelniany nr 1598, Gliwice 1991.

Abstract

Relation between ash content in tailings and the slurry level in the flotation cell has an extreme character for stable conditions of flotation operation. An optimum slurry level is that for which the ash content in flotation tailings is the highest at these conditions. In the paper are presented results of simulation analysis of the control system automatically searching for the optimum desired value of the slurry level. The control algorithm is based on the periodic correction of the slurry level in the direction of the ash content in tailings increase. Investigated extreme control system reduces losses of coal in tailings in comparison to the conventional control algorithm without the correction of the level desired value.