

JERZY SIWIŃSKI, BERNARD ŚWIERCZYŃNA
Katedra Automatyki Procesów Przemysłowych

UKŁAD AUTOMATYCZNEJ REGULACJI
GĘSTOŚCI NADAWY NA FLOTACJĘ

Streszczenie: W pracy przeanalizowano własności układu automatycznej regulacji gęstości nadawy na flotację, wypróbowanego na jednej z krajowych kopalń. Opisano działanie zastosowanego układu z regulatorem trójpołożeniowym. Analizowany układ automatycznej regulacji jest nieliniowy. Analizę przeprowadzono metodą funkcji opisującej. Przedstawiono sposób obliczenia nastawienia regulatora zastosowanego w układzie dla zadanej dokładności regulacji.

1. Wstęp

Przy mechanicznym urabianiu węgla stosunkowo duży procent urobku otrzymuje się w postaci drobnego miazgu. Miazg ten, składający się z mieszaniny węgla i kamienia, musi być poddany procesowi wzbogacania, który polega na oddzieleniu ziarn węgla od ziarn kamienia. Wzbogacanie ziarn o wymiarze poniżej 1 mm odbywa się zwykle metodą flotacyjną. Podlegający wzbogaceniu miazg zmieszany z wodą tworzy nadawę doprowadzaną do maszyn flotacyjnych. Zagęszczanie nadawy określone stosunkiem materiału stałego do wody powinno wynosić przy wzbogacaniu węgla od 1:4 do 1:3 (a przy wzbogacaniu rud od 1:5 do 1:3).

W maszynach flotacyjnych nadawa po dodaniu niewielkiej ilości odpowiedniego odczynnika jest intensywnie mieszana przez ruch wirnika, który równocześnie zasysa powietrze. Zdyspergowane ruchem wirnika powietrze, wpływając do góry w postaci drobnych pęcherzyków, wynosi ziarna węgla określane dalej jako koncentrat. Na dnie zbierają się ziarna minerałów płonnych stanowiące odpady.

Zadaniem wszystkich metod wzbogacania, w tym również flotacji, jest otrzymanie maksymalnej ilości minerału użytecznego w koncentracji i minimalnych jego strat w odpadach. Przy flotacji węgla o zawartości popiołu 13-20% powinno się otrzymać koncentrat nadający się do koksowania o zawartości popiołu 7 do 7,5%, a w odpadach nie mniej niż 70%. W rzeczywistości zawartość popiołu w odpadach często

obniża się i w niektórych przypadkach wynosi 42-45%. Odpady takie wykorzystuje się jako paliwo energetyczne.

Na proces flotacji ma wpływ szereg czynników, do których w głównej mierze należą: gęstość nadawy, czas przebywania nadawy w komorze flotacyjnej, rozchód odczynników. Parametry te przy braku automatycznej regulacji podlegają częstym i dużym wahaniom w czasie. Szczególnie szkodliwe są wahania gęstości nadawy.

W niniejszej pracy przeprowadzono analizę własności układu automatycznej regulacji gęstości nadawy na flotację, wypróbowanego na jednej z krajowych kopalń węgla kamiennego.

2. Opis układu automatycznej regulacji

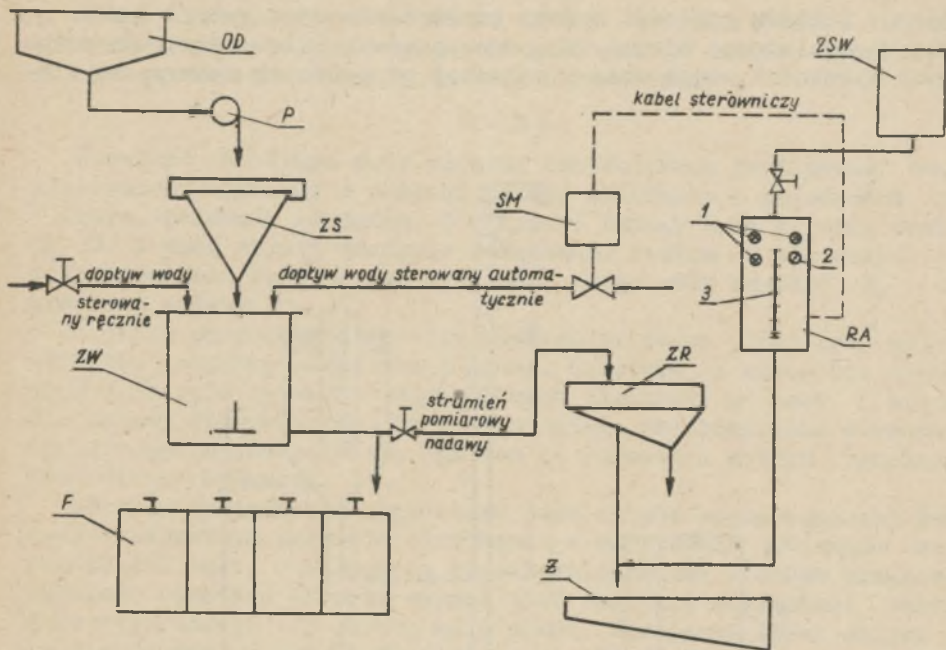
Automatyczną regulację gęstości nadawy na flotację wykonuje regulator trójpołożeniowy składający się z członu pomiarowego, układu przekaźnikowego, serwomotoru i zaworu nastawczego na rurociągu doprowadzającym wodę czystą.

Ogólny schemat układu przedstawiono na rys.1. Nadawa o zbyt dużej gęstości dopływa z osadnika Dorra OD poprzez zagęszczacz stożkowy ZS do zbiornika wyrównawczego ZW, do którego dopływa również woda czysta. Gęstość nadawy wypływającej ze zbiornika wyrównawczego ZW do maszyn flotacyjnych F powinna być stała, niezależnie od zmian gęstości nadawy dostarczanej z osadnika Dorra. Aby to uzyskać należy wraz ze zmianą gęstości nadawy dostarczanej z osadnika Dorra zmieniać dopływ wody czystej do zbiornika wyrównawczego.

Przy obsłudze ręcznej można zmieniać dopływ wody przez zmianę nastawienia zaworu ręcznego. Przy obsłudze automatycznej nastawienie zaworu na rurociągu dopływowym wody czystej wykonuje serwomotor SM sterowany impulsami elektrycznymi z czujnika elektrodowego reagującego na zmiany gęstości. Impulsy elektryczne przekazywane są od czujnika do serwomotoru za pomocą kabla sterowniczego. Gęstość nadawy dopływającej do maszyn flotacyjnych kontroluje się przy obsłudze ręcznej przez pomiar próbek nadawy pobieranych w odstępach parogodzinnych (dokonywany w laboratorium). Wyniki tych pomiarów są wskazówką dla obsługi, czy i jak należy zmieniać nastawienie zaworu ręcznego na dopływie wody do zbiornika wyrównawczego ZW. Natomiast przy obsłudze automatycznej gęstość nadawy dopływającej do maszyn flotacyjnych kontrolowana jest w sposób ciągły.

W analizowanym rozwiązaniu woda dopływa do zbiornika wyrównawczego ZW dwoma rurociągami. Na jednym z nich znajduje się zawór ręczny otwarty do około połowy swojego przelotu. Nastawienie tego zaworu pozostaje stałe. Na drugim rurociągu znajduje się zawór automatyczny sterowany przez serwomotor SM. Nastawienie tego zaworu zmienia się samoczynnie wraz ze zmianą gęstości nadawy dopływającej do maszyn flotacyjnych. Każde odchylenie gęstości od wartości żąda-

nej powoduje automatycznie odpowiednie przestawienie zaworu na dopływie wody do zbiornika ZW, co z powrotem sprowadza gęstość nadawy do wartości zadanej. W ten sposób regulator utrzymuje stałą gęstość cieczy w zbiorniku wyrównawczym ZW.

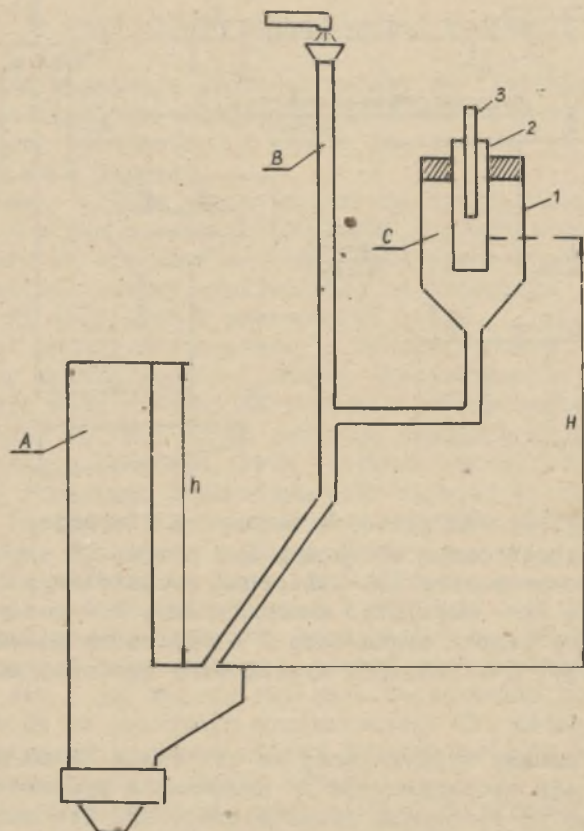


Rys.1. Schemat ogólny UAR gęstości nadawy na flotację: OD - osadnik Dorra; ZS - zagęszczacz stożkowy; P - pompa; ZW - zbiornik wyrównawczy; SM - serwowator; ZR - zbiornik rozdzielczy; ZSW - zbiornik wody czystej; RA - regulator automatyczny; F - maszyny flotacyjne; Z - żapie; 1 - lampki sygnałowe; 2 - wyłącznik główny napięcia zasilającego; 3 - wskaźnik wyskalowany gęstości nadawy

Drobna część nadawy wypływającej ze zbiornika ZW do maszyn flotacyjnych F zostaje zbocznikowana do urządzenia pomiarowego gęstości, przyłączonego do zbiornika rozdzielczego ZR. Ten mały strumień nadawy, odgałęziony od strumienia głównego dla celów pomiarowych, może być po przejściu przez miernik gęstości skierowany wraz ze strumieniem głównym do maszyn flotacyjnych. Jednak do tego konieczna jest odpowiednio duża różnica poziomów między zbiornikiem wyrównawczym ZW i maszynami flotacyjnymi F.

W urządzeniu analizowanym w niniejszej pracy potrzebna do tego celu różnica poziomów okazała się za mała. wobec tego pomiarowy strumień nadawy po przejściu przez miernik gęstości skierowano do żąbia. (Oczywiście przy ewentualnym zastosowaniu pompy można by go również skierować z powrotem do zbiornika ZW lub razem ze strumieniem głównym do maszyn F).

Zasadę pomiaru gęstości nadawy przedstawiono na rys.2. Pomiar gęstości w regulatorze odbywa się przez porównanie w naczyniach połączonych wysokości słupa wody H zależnej od gęstości nadawy, ze sta-



Rys.2. Miernik gęstości nadawy wraz z czujnikiem elektrodowym:
 A - rura przelewowa z nadawą; B - rurka z wodą czystą; C - czujnik,
 1,2,3, - elektrody czujnika

łą wysokością słupa nadawy h , równą wysokości rury przelewowej zasilanej nadawą. Do dolnej części rury przelewowej wmontowana jest cienka rurka z wodą czystą. Górny wylot tej rurki zasilany jest małym strumieniem wody czystej o wydajności około 2 l/h. Rura przelewowa zakończona jest na dole zwężką, przez którą odpływa niewielki strumień nadawy z małą domieszką wody.

W tej sytuacji wysokość słupa nadawy h jest stała, natomiast wysokość słupa wody H zależy od gęstości γ nadawy przepływającej przez rurę przelewową, zgodnie z równaniem

$$H = h\gamma \quad (1)$$

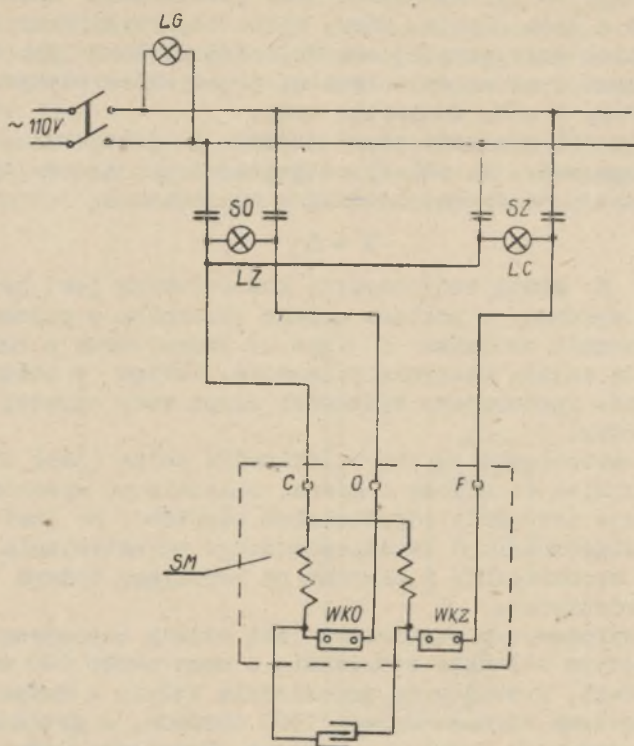
Wysokość H słupa wody czystej kontrolowana jest przez czujnik elektrodowy wykonany w postaci małego zbiornika o pojemności około 1 litra. Zbiornik czujnika C (rys.2) tworzy wraz z rurką pomiarową B z wodą czystą naczynie połączone. Poziom w zbiorniku czujnika odpowiada każdorazowo wysokości słupa wody czystej H , czyli gęstości nadawy.

W czujniku umieszczone są trzy elektrody: dolna (jest nią metalowy zbiornik czujnika) środkowa i górna. Zależnie od wysokości słupa wody H następuje zwieranie odpowiednich elektrod, co jest sygnałem dla układu sterowniczego do odpowiedniego przestawienia serwomotoru sprzężonego mechanicznie z zaworem na rurociągu wodnym zasilającym zbiornik wyrównawczy.

Członem wykonawczym regulatora jest silnik asynchroniczny dwufazowy w nawrotnym układzie sterowania o mocy około 100 watów na napięcie 110 wolt, z wbudowaną przekładnią zębatą o dużym przełożeniu. Prędkość obrotowa wirnika wynosi 1500 obr/min, a prędkość obrotowa wału wyjściowego 1/2 obrotu na 5 minut. Uzwojenia cewek obydwu faz są identyczne, z tym że do jednego z nich jest przyłączony w szereg kondensator o pojemności $0,5\mu\text{F}$. Role obydwu cewek zmieniają się zależnie od kierunku obrotów silnika, przez przełączenie kondensatora raz do jednej cewki, drugi raz do drugiej, rys.3. Odpowiednie przełączenia wykonuje układ sterowniczy zgodnie z impulsami otrzymywany mi od czujnika elektrodowego.

Układ sterowniczy zastosowany w regulatorze przedstawiono na rys 4. Układ ten składa się z dwóch przekaźników pośredniczących PO i PZ, dwóch styczników SO i SZ oraz wyłączników krańcowych WKO i WKZ. Wyłączniki krańcowe umieszczone są wewnątrz obudowy obejmującej wspólnie silnik i przekładnię i tworzą wraz z silnikiem jedną całość konstrukcyjną. Na obudowie serwomotoru obejmującej silnik, przekładnię i dwa wyłączniki krańcowe, znajdują się trzy zaciski wejściowe.

Przekaźniki PO i PZ zasilane są napięciem zmiennym obniżonym do 24 wolt, a styczniki SO i SZ napięciem zmiennym 110 wolt. Obniżenie napięcia zasilającego przekaźniki do 24 wolt zastosowano dlatego, że obwód cewki każdego przekaźnika zamyka się przez słup wody przy zwieraniu elektrod. Układ sterowany jest przez sygnały G i D nadawane z czujnika elektrodowego. Litery G i D oznaczają równocześnie graniczne poziomy wody w czujniku: G - górny i D - dolny. Zamknię-

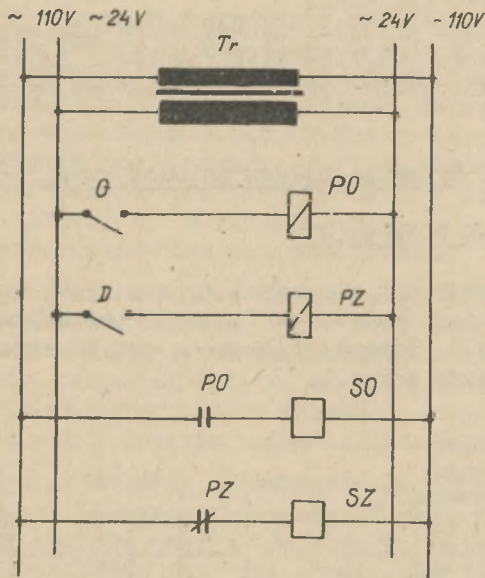


Rys.3. Sposób przyłączenia serwowatoru do sieci: SM - serwowator; WKO, WKZ - wyłączniki krańcowe: otwierania, zamykania; SO, SZ - styki styczników: otwierania, zamykania; LG - Lampka sygnalizacyjna główna; LZ, LC lampki sygnalizacyjne: zielona, czerwona; C, O, F - za ciski serwowatoru

cie styku D na rys.4 odpowiada zwarcie przez szpudł wody elektrod dolnej i środkowej czujnika, a zamknięcie styku G odpowiada zwarcie przez szpudł wody elektrod środkowej i górnej czujnika (wtedy oczywiście woda zwiera wszystkie trzy elektrody).

Jeżeli poziom wody w czujniku obniży się poniżej dolnego położenia granicznego D, co odpowiada za małej gęstości nadawy, to wszystkie trzy elektrody pozostają rozwarne. Wtedy w układzie sterowniczym (rys.4) obydwa styki G i D są otwarte, obydwa przekaźniki PO i PZ są nieczynne, zatem działa stycznik zamykania zaworu SZ. Wtedy serwowator zmniejsza przepływ wody na rurociągu dopływowym wody, przez co gęstość nadawy wzrasta i poziom wody w czujniku podnosi

się z powrotem powyżej położenia granicznego D. Wtedy działa prze-
kaźnik PZ, zatem otwiera się stycznik SZ, serwomotor zatrzymuje się.



Rys.4. Układ sterowniczy serwomotoru regulatora: Tr - transformator; G,D - styki ilustrujące zwieranie elektrod czujnika przy poziomie wody: górnym i dolnym; PO, PZ - przekaźniki pośredniczące: otwierania, zamykania; SO, SZ - styczniki: otwierania, zamykania

Jeżeli natomiast poziom wody w czujniku podniesie się powyżej górnego podłożenia granicznego G, co odpowiada za dużej gęstości nadawy, to wszystkie trzy elektrody pozostają zwarte. Wtedy w układzie sterowniczym (rys.4) obydwie styki G i D są zamknięte, obydwie przekaźniki są czynne, zatem działa stycznik otwierania zaworu SO. Wtedy serwomotor zwiększa przelot zaworu na rurociągu do pływowej wody, przez co gęstość nadawy maleje i poziom wody w czujniku obniża się z powrotem poniżej położenia granicznego G. Wówczas zwalnia przekaźnik PO, zatem otwiera się stycznik SO, serwomotor za trzymuje się.

Jeżeli poziom wody w czujniku zajmuje wartość pośrednią między położeniami granicznymi dolnym D i górnym G, co odpowiada dobrej gęstości nadawy (zgodnej z wartością zadaną), to w układzie sterowniczym (rys.4) styk G pozostaje otwarty, a D zamknięty. Wtedy przekaźnik PO nie działa, a PZ działa. Zatem obydwie styczniki SO i SZ

są nieczynne, serwomotor pozostaje nieruchomy, przepływ wody dodawanej w zbiorniku wyrównawczym do nadawy pozostaje stały.

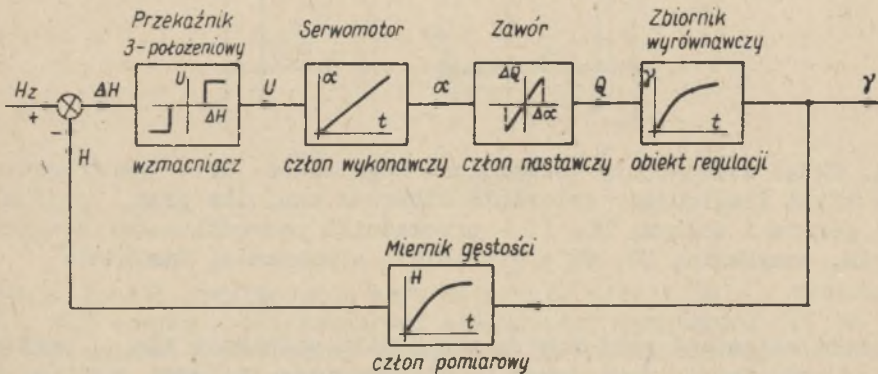
Jak wynika z powyższych warunków pracy układu sterowniczego, jest to w gruncie rzeczy układ automatycznej stabilizacji poziomu wody w zbiorniku czujnika.

Zadaną wartość gęstości nadawy można nastawiać przez zmianę wysokości położenia czujnika elektrodowego. Służy do tego celu specjalne pokrętło ręczne wystające z obudowy regulatora.

3. Dynamika układu automatycznej regulacji

3.1. Schemat blokowy UAR

W celu sprawdzenia własności dynamicznych układu automatycznej regulacji gęstości nadawy na flotację zestawiamy schemat blokowy tego układu, rys.5. Schemat blokowy z rys.5 zestawiono na podstawie schematu ogólnego z rys.1.



Rys.5. Schemat blokowy UAR gęstości nadawy na flotację

W schemacie blokowym (rys.5) występują następujące człony:

- a) Wzmacniacz. Człon ten reprezentuje czujnik trójelektrodowy (rys.2) wraz z układem przełącznikowo-stycznikowym (rys.3 i 4). Jest to element nieliniowy mający charakterystykę przełącznika 3-położeniowego ze strefą nieczułości. Wobec dużych stałych czasowych pozostałych członów układu można pominąć czasy własne zadziałania i zwalniania przełączników i styczników i przyjąć, że jest to charakterystyka przełącznika 3-położeniowego bez histerezy.

Sygnałem wejściowym tego członu jest przyrost wysokości słupa wody ΔH , a sygnałem wyjściowym napięcie sieci U , które w wyniku zadziałania stycznika zostaje doprowadzone do zacisków serwomotoru.

- b) Człon wykonawczy - jest to serwomotor sprzężony mechanicznie z zaworem zainstalowanym na rurociągu doprowadzającym wodę do zbiornika wyrównawczego. Sygnałem wejściowym tego członu jest napięcie U doprowadzone z sieci na skutek zadziałania stycznika, a sygnałem wyjściowym - kąt obrotu α od jego położenia środkowego, w którym zawór otwarty jest do połowy. Ponieważ prędkość obrotowa serwomotoru jest wielkością stałą, to wykres zmian kąta obrotu α w funkcji czasu $\alpha = f(t)$ jest linią prostą przechodzącą przez początek układu.
- c) Człon nastawczy - jest to zawór na rurociągu wodnym, przestawiany przez serwomotor. Sygnałem wejściowym tego członu jest jego kąt obrotu α od położenia środkowego, a sygnałem wyjściowym natężenie przepływu wody Q . Kąt obrotu zaworu może zmieniać się tylko w ograniczonym zakresie - od położenia całkowitego otwarcia do położenia całkowitego zamknięcia.

Zmiany natężenia przepływu wody Q towarzyszące zmianom gęstości nadawy γ zapewniają stabilizację tej gęstości pod warunkiem, że zmiany gęstości cieczy dopływającej z osadnika Dorra nie będą wahać się w zbyt szerokich granicach, tzn. nie przekroczą wartości dopuszczalnych odpowiadających krańcowym położeniom zaworu.

Rozpatrywać będziemy dynamikę UAR (układu automatycznej regulacji) dla zaburzeń wywołujących zmianę gęstości w paśmie dopuszczalnym $|\Delta\gamma| \leq \Delta\gamma_{\max}$. Oznacza to, że UAR będzie w stanie doprowadzić gęstość γ do wartości zadanej γ_z z błędem mniejszym od $\pm \gamma_a$, gdzie przez γ_a oznaczono strefę nieczułości czujnika w odniesieniu do gęstości. W tym przypadku zawór nastawiający dopływ wody do mieszalnika (zbiornika wyrównawczego) nie osiągnie pod koniec interwencji UAR żadnego z krańcowych położen, tzn. nie będzie całkowicie zamknięty albo otwarty.

Przy takim założeniu warunków pracy UAR można potraktować zawór jako człon bez nasycenia, gdyż kąt obrotu zaworu będzie mniejszy od wartości granicznych zawartych między $-\frac{\pi}{4}$ i $+\frac{\pi}{4}$. W tym zakresie zmian kąta można w przybliżeniu potraktować zawór jako człon liniowy. Przy zmianach kąta α o $\Delta\alpha$ natężenie przepływu Q zmienia się o ΔQ . Wykres $\Delta Q = f(\Delta\alpha)$ przechodzi przez początek układu i w założonych warunkach może być w przybliżeniu uważany za linię prostą.

- d) Obiekt regulacji - jest to zbiornik wyrównawczy (mieszalnik), w którym następuje mieszanie cieczy gęstej doprowadzonej z osadnika Dorra z odpowiednio nastawionym strumieniem wody. Sygnałem wejściowym tego elementu jest natężenie przepływu wody Q przez zawór nastawczy, a sygnałem wyjściowym - gęstość

nadawy γ wypływającej ze zbiornika do maszyn flotacyjnych. Zbiornik wyrównawczy jest członem inercyjnym wyższego rzędu. Przy badaniu dynamiki UAR aproksymujemy jego charakterystykę do charakterystyki członu inercyjnego pierwszego rzędu.

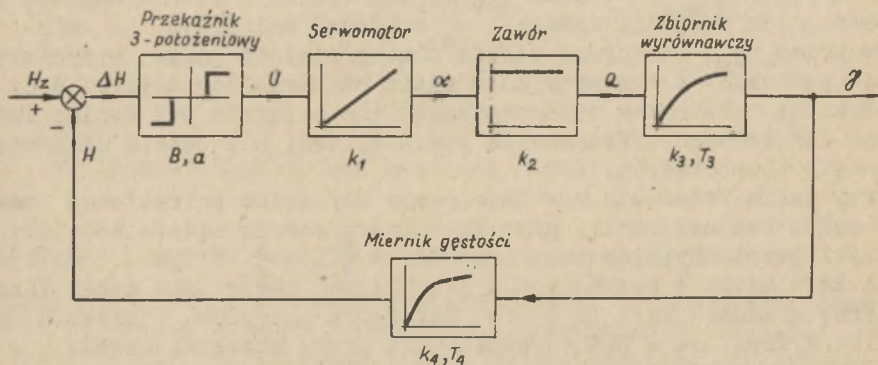
- f) Człon pomiarowy - jest to miernik gęstości nadawy (rys.2), składający się z rury przelewowej z nadawą i rurki z wodą czystą. Do rurki z wodą czystą przyłączony jest w charakterze naczynia połączonego czujnik elektrodowy, który na schemacie blokowym włączony został do wzmacniacza. Sygnałem wejściowym tego członu jest gęstość nadawy γ , a wyjściowym - wysokość słupa wody H .

Rura przelewowa jako element pomiarowy jest członem inercyjnym pierwszego rzędu. Jego stała czasowa zmierzona doświadczalnie wynosi około 3 minut.

- g) Wezeł sumujący. Porównanie aktualnej wysokości słupa wody H (rys.2) z wysokością zadaną H_z odbywa się w czujniku elektrodowym. Zadana wysokość H_z nastawia się przez zmianę wysokości położenia czujnika.

3.2. Uproszczony schemat blokowy UAR

Wprowadzając do UAR omówione wyżej uproszczenia, nie mające istotnego wpływu na jego własności dynamiczne, możemy przedstawić schemat blokowy układu w sposób uproszczony jak na rys.6.



Rys.6. Uproszczony schemat blokowy UAR gęstości nadawy na flotację

Jak widać z rys.6, zawór potraktowano jako element liniowy bezinercyjny, zgodnie z omówionym uprzednio uproszczeniem. Bezinercyjność zaworu można w tym przypadku uzasadnić małą odległością między zaworem a wylotem rury sterowanej tym zaworem.

Uproszczony schemat blokowy UAR (rys.6) zawiera jeden element nieliniowy i cztery elementy liniowe. W celu przeanalizowania własności dynamicznych takiego układu wyznaczamy najpierw przepustowość operatorową jego części liniowej, a potem uwzględniamy człon nieliniowy stosując metodę funkcji opisującej.

3.3. Przepustowości operatorowe członów liniowych uproszczonego UAR

a) Przepustowość operatorowa serwowomatoru

$$w_1(p) = \frac{\Delta \alpha(p)}{U(p)} = \frac{k_1}{p} \quad (2)$$

przy czym współczynnik k_1 można wyznaczyć z zależności

$$k_1 = \frac{\Delta \alpha}{U \cdot t} \quad (3)$$

gdzie $\Delta \alpha$ oznacza przyrost kąta obrotu przesłony zaworu, czyli przyrost kąta obrotu wału wyjściowego przekładni napędzanej przez serwowomator, przy przyłożeniu do zacisków serwowomatoru napięcia U na czas t .

W analizowanym UAR właśnie dla współczynnika k_1 można praktycznie najłatwiej dobrać różne wartości przez zmianę przełożenia przekładni zębatej serwowomatoru. Dlatego przy analizie stabilności UAR będziemy wyznaczać wartość tego właśnie współczynnika, tak aby UAR był stabilny.

b) Przepustowość operatorowa zaworu

$$w_2(p) = \frac{\Delta Q(p)}{\Delta \alpha(p)} = k_2 \quad (4)$$

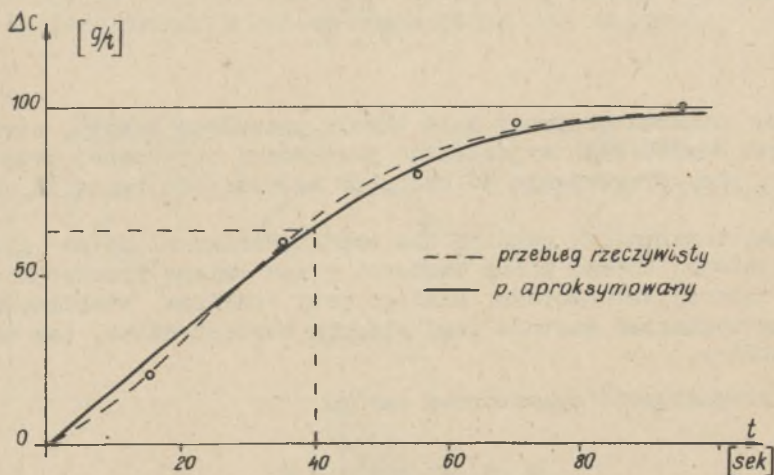
przy czym ΔQ oznacza przyrost natężenia przepływu wody przez zawór przy obrocie dźwigni serwowomatoru o kąt $\Delta \alpha$.

c) Przepustowość operatorowa zbiornika wyrównawczego

$$W_3(p) = \frac{\Delta y(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{k_3}{1 + p T_3} \quad (5)$$

Współczynnik wzmocnienia zbiornika wyrównawczego $k_3 = \frac{\Delta y}{\Delta Q}$ jest zależny od napełnienia tegoż zbiornika. Przy większym napełnieniu zbiornika współczynnik k_3 będzie mniejszy, i odwrotnie, przy mniejszym napełnieniu zbiornika współczynnik k_3 będzie większy.

Przy obserwacji pracy urządzenia flotacji jeszcze przed dołączeniem układu automatyki stwierdzono, że wahania w napełnieniu zbiornika wyrównawczego wokół pewnego średniego poziomu występują tylko przez niedługi czas na początku i końcu każdej zmiany załogi w zakładzie przerobczym. Zatem można je w rozważaniach pominąć i przyjmując dla współczynnika k_3 wartość liczbową stałą otrzymaną z pomiarów dokonanych w warunkach normalnego przebiegu procesu technologicznego flotacji. Ze względu na duże trudności jakie napotyka się przy próbie zmierzenia wartości współczynników k_2 i k_3 , najlepiej wyznaczyć współczynnik zastępczy $k' = k_2 k_3 k_4$, bez konieczności częściowego demontażu układu. Wykonamy to po znalezieniu wyrażenia na przepustowość operatorową całego UAR w stanie otwartym.



Rys.7. Przyrost stężenia nadawy w zbiorniku wyrównawczym w funkcji czasu $\Delta c = f(t)$ przy zamknięciu dopływu wody na rurociągu z zaworem sterowanym

Stałą czasową T_3 zbiornika wyrównawczego wyznaczono na podstawie pomiarów, których wyniki ujęto wykreslnie na rys.7. W celu otrzymania tego wykresu zamknięto całkowicie dopływ wody Q na rurociągu z zaworem sterowanym automatycznie, po czym w odstępach kilkunastosekundowych pobierano próbki nadawy dopływającej do maszyn flotacyjnych i mierzono w laboratorium ciężar właściwy tych próbek. Otrzymany w ten sposób przebieg rzeczywisty (na rys.7 linia przerywana), który jest przebiegiem inercyjnym wyższego rzędu, aproksymowano do przebiegu aperiodycznego (na rys.7 linia ciągła), z którego wyznaczono stałą czasową $T_3 = 40$ s.

d) Przepustowość operatorowa miernika gęstości

$$W_4(p) = \frac{\Delta H(p)}{\Delta \gamma(p)} = \frac{k_4}{1 + pT_4} \quad (6)$$

przy omówionym wyżej założeniu, że miernik ten będący członem całkującym z nasyceniem traktujemy w przybliżeniu jako człon inercyjny pierwszego rzędu.

Współczynnik $k_4 = \frac{\Delta H}{\Delta \gamma}$ można obliczyć z zależności

$$(\gamma + \Delta \gamma) \cdot h = (H + \Delta H) \gamma_{H_2O} \quad (7)$$

Ale $\gamma_{H_2O} = 1$, zatem można napisać równanie przyrostów

$$\Delta \gamma \cdot h = \Delta H \quad (8)$$

i stąd współczynnik wzmocnienia miernika gęstości

$$k_4 = \frac{\Delta H}{\Delta \gamma} = h \quad (9)$$

Tzn. współczynnik k_4 równa się wysokości rury przelewowej h . W urządzeniu analizowanym zastosowano $h = 3$ metry.

Jeżeli np. zwiększyć stężenie nadawy o 100 gr/litr, co odpowiada przyrostowi gęstości nadawy $\Delta\gamma = 0,023 \text{ gr/cm}^3$, to otrzymuje się przyrost słupa wody

$$\Delta h = H \cdot \Delta\gamma = 300 \cdot 0,023 = 6,9 \text{ cm} \quad (10)$$

Stała czasowa miernika gęstości T_4 oznacza czas potrzebny do całkowitego wyparcia z rury przelewowej nadawy o gęstości γ_1 przez nadawę o jakiejś innej gęstości γ_2 . W wyniku przeprowadzonych pomiarów otrzymano $T_4 = 3$ minuty.

3.4. Przepustowość operatorowa części liniowej UAR

Przepustowość ta wyrazi się wzorem

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) \quad (11)$$

Po podstawieniu na miejsce poszczególnych przepustowości odpowiednich wyrażeń otrzymamy:

$$W(p) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{p(1 + pT_3) \cdot (1 + pT_4)} \quad (12)$$

Wartość liczbowa iloczynu $k_2 k_3 k_4$, tworzącego pewien zastępczy współczynnik wzmocnienia

$$k' = k_2 k_3 k_4 = \frac{\Delta H}{\Delta\alpha}$$

można wyznaczyć stosunkowo łatwo doświadczalnie, bez potrzeby częściowego demontażu układu. Wystarczy w tym celu przestawić zawór o pewien kąt $\Delta\alpha$ i zaobserwować ustaloną wartość przyrostu słupa wody ΔH . W konkretnym przypadku przy $\Delta\alpha = \frac{\pi}{2}$ otrzymano $\Delta H = 4,5 \text{ cm}$. Zatem

$$k' = \frac{\Delta H}{\Delta\alpha} = \frac{4,5}{\pi/2} = 0,287 \frac{\text{cm}}{\text{rd}} \quad (13)$$

Stałe czasowe T_3 i T_4 wynoszą odpowiednio 40 sekund i 3 minuty = 180 sekund.

Przepustowość operatorowa części liniowej UAR po podstawieniu wyznaczonych doświadczalnie wartości liczbowych ma postać

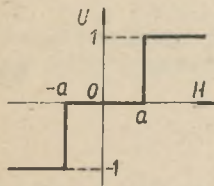
$$W(p) = \frac{k_1 \cdot 0,287}{p(1+40p)(1+180p)} \quad (14)$$

Nieznana w powyższym wyrażeniu wartość współczynnika k_1 , obejmującego również przełożenie przekładni serwomotoru, wyznaczmy tak, aby przy tej wartości UAR był stabilny.

3.5. Analiza stabilności UAR metodą funkcji opisującej

Ze względu na istnienie dużych stałych czasowych w przepustowości operatorowej części liniowej UAR można przy badaniu stabilności tego układu nieliniowego zastosować metodę funkcji opisującej.

Dla czujnika trójpołożeniowego o charakterystyce przekaźnikowej bez histerezy (rys.8) funkcja opisująca \hat{I} ma postać



$$\hat{I} = \frac{U}{a} \cdot \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{1 - \frac{1}{(\frac{A}{a})^2}}{(\frac{A}{a})^2}} \quad (15)$$

Rys.8. Charakterystyka czujnika trójpołożeniowego

gdzie A oznacza amplitudę sygnału wejściowego.

Warunek stabilności układu, przy wykorzystaniu kryterium Nyquista oraz funkcji opisującej, wymaga aby

$$\hat{I}_{\max} \cdot W(j\omega_{180}) > -1 \quad (16)$$

Przepustowość widmowa części liniowej UAR, otrzymana przez podstawienie do przepustowości operatorowej $p = j\omega$ wyrazi się następująco

$$W(j\omega) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{j\omega(1+j\omega T_3)(1+j\omega T_4)} = -k_1 k_2 k_3 k_4 \frac{\omega(T_3+T_4) + j(1-\omega^2 T_3 T_4)}{\omega^5 T_3^2 T_4^2 + \omega^3(T_3^2 + T_4^2) + \omega} \quad (17)$$

Wartość $W(j\omega_{180})$ otrzymamy przez podstawienie do wyrażenia $W(j\omega)$ wartości $\omega = \omega_{180}$, co jest równoznaczne z przyrównaniem do zera części urojonej wyrażenia na $W(j\omega)$

$$1 - \omega_{180}^2 T_3 T_4 = 0; \quad \omega_{180} = \sqrt{\frac{1}{T_3 T_4}} \quad (18)$$

Po podstawieniu znalezionej wartości ω_{180} do wyrażenia $W(j\omega)$ otrzymamy

$$W(j\omega_{180}) = -k_1 k_2 k_3 k_4 \frac{T_3 T_4}{T_3 + T_4} \quad (19)$$

Funkcja opisująca \hat{I} dla członu nieliniowego jak na rys.8 posiada maksimum

$$\hat{I}_{\max} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U}{a} \quad (20)$$

Po podstawieniu do warunku stabilności znalezionych wartości $W(j\omega_{180})$ i \hat{I}_{\max} otrzymamy

$$\frac{2}{\pi} \cdot \frac{U}{a} k_1 k_2 k_3 k_4 \cdot \frac{T_3 T_4}{T_3 + T_4} < 1 \quad (21)$$

Układowi automatycznej regulacji postawiono zadanie stabilizacji stężenia nadawy z dokładnością ± 20 g/l. Stąd wynika dopuszczalna wartość strefy nieczułości "a" czujnika elektrodowego (rys.8). Ta strefa nieczułości równa się połowie odległości między elektrodami środkową i górną.

Strefę nieczułości "a" w zależności od dopuszczalnych wahań stężenia nadawy obliczamy w następujący sposób:

Między stężeniem nadawy "c" a jej gęstością γ istnieje zależność

$$\gamma = 1 + c \frac{\gamma_z - 1}{1000 \cdot \gamma_z} \quad (22)$$

gdzie γ_z ciężar właściwy zawiesziny (flotowanego materiału). W naszym przypadku przyjmujemy $\gamma_z = 1,3$ g/cm³. Równanie (22) zapisane dla przyrostów otrzyma postać

$$\Delta\gamma = \frac{\gamma_z - 1}{1000 \cdot \gamma_z} \cdot \Delta c = \frac{1,3 - 1}{1000 \cdot 1,3} \cdot \Delta c = 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta c \quad (23)$$

Uwzględniając podaną już poprzednio zależność między przyrostem skłupa wody w mierniku gęstości ΔH i zmianą gęstości nadawy $\Delta\gamma$

$$\Delta H = h \cdot \Delta\gamma$$

otrzymamy

$$\Delta H = 300 \cdot 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta c = 0,069 \cdot \Delta c \quad (24)$$

Przy dopuszczalnych wahań stężenia nadawy ± 20 g/l, ΔH powinno się wahać w granicach

$$\Delta H = 0,069 \cdot (\pm 20) = \pm 1,4 \text{ cm} \quad (25)$$

Stąd wniosek, że odległość między elektrodami czujnika środkową i górną, czyli jego podwójna strefa nieczułości, nie powinna przekroczyć wartości

$$2a \leq 2,8 \text{ cm} \quad \text{czyli} \quad a \leq 1,4 \text{ cm} \quad (26)$$

Z otrzymanego poprzednio warunku stabilności (21) otrzymamy dla współczynnika wzmocnienia k_1

$$k_1 < \frac{\pi a}{2 U} \frac{T_3 + T_4}{T_3 T_4} \frac{1}{k_2 k_3 k_4} \quad (27)$$

Po podstawieniu $a = 1,4 \text{ cm}$, $U = 110 \text{ V}$, $T_3 = 40 \text{ sek}$, $T_4 = 180 \text{ sek}$, $k_2 k_3 k_4 = 2,86$ otrzymamy

$$k_1 < \frac{\pi \cdot 1,4}{2 \cdot 110} \frac{40 + 180}{40 \cdot 180} \cdot \frac{1}{2,86}$$

$$k_1 < 2,13 \cdot 10^{-4} \quad (28)$$

Ale $k_1 = \frac{\Delta\alpha}{U \cdot t}$, a $\Delta\alpha = \frac{2\pi n \cdot \frac{1}{z} \cdot t}{60}$ (29)

gdzie n - obroty serwowatoru; z - przełożenie przekładni zębatej; t - czas pracy serwowatoru, zatem

$$k_1 = \frac{2\pi n \cdot \frac{1}{z}}{60 \cdot U} \quad (30)$$

czyli

$$z = \frac{2\pi n}{60 \cdot U \cdot k_1} \quad (31)$$

Z warunku stabilności (28) ograniczającego wartość współczynnika k_1 otrzymamy warunek dla minimalnej wartości przełożenia przekładni zębatej

$$z_{\min} = \frac{2\pi \cdot n}{60 \cdot U \cdot k_{\max}} = \frac{2\pi \cdot 1500}{60 \cdot 110 \cdot 2,13 \cdot 10^{-4}} = 6700 \quad (32)$$

W analizowanym UAR jest zastosowana przekładnia o przełożeniu $z = 15000$, zatem

$$z > z_{\min}$$

czyli układ posiada duży zapas stabilności względem współczynnika k_1 i nie należy obawiać się możliwości powstania oscylacji.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ ПЛОТНОСТИ ШИХТЫ ДЛЯ ФЛОТАЦИИ

Резюме

В работе рассмотрены свойства системы автоматического регулирования плотности шихты для флотации, опробованной на одной из отечественных шахт. Описана работа примененной системы с трёхпозиционным регулятором. Анализированная система автоматического регулирования - нелинейная. Анализ провели по методу описывающей функции. Приводится способ расчёта наладки регулятора применённого в системе для принятой точности регулирования.

EINE EINRICHTUNG SELBSTTÄTIGER DICHTENREGELUNG
DER FLOTATIONSTRÜBE

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine Analyse der Eigenschaften einer Einrichtung selbsttätiger Dichtenregelung der Flotationstrübe, ausprobiert in einer Grube, durchgeführt. Man beschrieb die Arbeitsweise der angewandten Einrichtung die einen Dreipunktregler besitzt. Der analysierte Regelkreis ist nichtlinear. Die Analyse wurde mit Hilfe der Beschreibungs-funktionsmethode durchgeführt. Zuletzt stellte man die Berechnung der Einstellungsgrößen des Reglers für die angegebene Genauigkeit der Regelung vor.