

Wiesław MAJCZKA<sup>x</sup>

Kazimierz SZTABA<sup>x</sup>

Kazimierz TRYBALSKI<sup>x</sup>

Tadeusz TUMIDAJSKI<sup>x</sup>

## IDENTYFIKACJA I STEROWANIE PROCESAMI TECHNOLOGICZNYMI W ZAKŁADACH PRZERÓBKI RUD

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono doświadczenia zdobyte w toku wieloletnich prac nad modelowaniem i sterowaniem wybranymi, przemysłowymi procesami przeróbki rud miedzi a także płynące stąd wnioski uogólniające, pozwalające na sformułowanie pewnych uwag metodycznych w tym zakresie. Przedstawiono przykłady postaci uzyskanych modeli procesów przeróbczych oraz przykłady układów sterowania wybranymi węzłami technologicznymi zakładu przeróbki rud miedzi.

### 1. Wstęp

Współczesny poziom rozwoju technologii przeróbki i osiągnane wyniki powodują, że dalszy, istotny postęp w tym zakresie jest możliwy pod warunkiem wprowadzenia sterowania procesem, na podstawie napływających danych o jego stanie opierając się na modelach matematycznych procesów. Realizacja identyfikacji procesów oraz sterowanie nimi przy uwzględnieniu warunkowań oraz specyfiki zakładów przeróbczych, a także aktualnych możliwości technicznych i ekonomicznych możliwe są z przeprowadzeniem dekompozycji układu technologicznego przeróbki kopalin. Dekompozycja obiektu polega na dokonaniu podziału całego układu na bloki funkcjonalne o ściśle określonych zadaniach, jakie spełniają one w całości procesu.

Doświadczenie zdobyte w toku wieloletnich prac nad modelowaniem wybranych procesów przeróbczych (bloków operacji) a zwłaszcza flotacji w skali przemysłowej, prowadzonych przez grupę pracowników Instytutu Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych AGH w Krakowie, a także płynące stąd wnioski uogólniające, pozwalają na zwarte przedstawienie całej wspomnianej problematyki.

<sup>x</sup>) Instytut Przeróbki i Wykorzystania surowców Mineralnych, Akademia Górniczo-Hutnicza - Kraków.

## 2. Problemy identyfikacji procesów technologicznych przeróbki rud

Identyfikacja złożonych procesów technologicznych, tzn. wielowymiarowych obiektów, jakimi są procesy przeróbki rud charakteryzujące się wysokim stopniem nieokreśloności, wynikającym z istnienia nieznanych, losowych zakłóceń przemysłowych i losowego charakteru strumieni materiałowych, wymaga stochastycznych metod opisu. Do tej pory w przeróbce surowców mineralnych brak zadowalających, wielowymiarowych modeli teoretycznych, opisujących wpływ różnych zmiennych na wyniki przebiegu procesów przemysłowych. Jest to podstawową przyczyną stosowania statystycznych metod poszukiwania modeli, opartych na wynikach eksperymentów przeprowadzanych na obiektach przemysłowych. Mogą to być eksperymenty bierne polegające na zbieraniu danych w warunkach normalnej eksploatacji obiektu lub czynne wymuszające zaplanowane układy warunków przebiegu procesu.

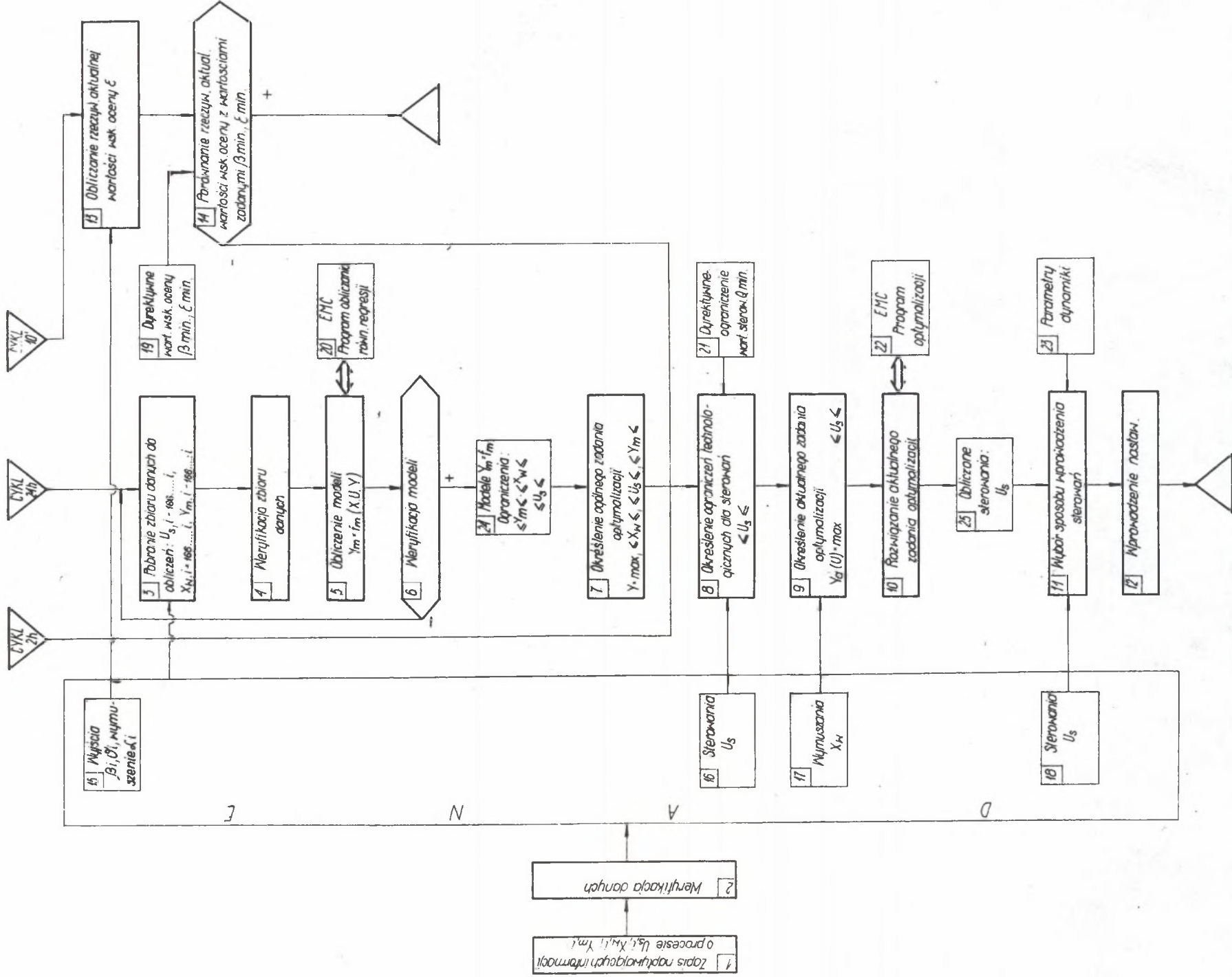
Charakter i przebieg eksperymentu odgrywają kluczową rolę w poszukiwaniu modeli fenomenologicznych. Praktycznie rzecz biorąc, można uzyskać trzy grupy modeli o różnych stopniach dokładności i możliwościach wykorzystania:

- modele uzyskane na podstawie chwilowych pomiarów zawartości (analyzerami automatycznymi), uzupełnione ręcznymi lub automatycznymi pomiarami wielkości sterujących (eksperyment czynny lub bierny),
- modele uzyskane na podstawie danych z eksperymentów czynnych, w których zadawano i utrzymywano na określonych poziomach wartości zmiennych sterujących, a zawartości składników uśredniano (pobierano średnie próbki ze strumieni), w trakcie trwania poszczególnych doświadczeń,
- modele uzyskane z danych uśrednianych w określonych odcinkach czasu eksperymentu biernego (przy względnej stałości wartości zmiennych sterujących).

Ze względu na to, że przemysłowy eksperyment czynny, najbardziej zbliża się do warunków laboratoryjnych - uśrednianie zawartości zmniejsza ich błędy - modele określone na ich podstawie lepiej charakteryzują tendencje występujące w procesie. W eksperymentach biernych dane chwilowe obciążone są większymi błędami analiz i błędami w określeniu czasu przejścia materiału przez układ (nie zawsze odpowiednim przyporządkowaniem danych), co obniża także dokładność modeli. Należy dodać, że w eksperymentach czynnym możliwe jest regularne rozmieszczenie doświadczeń w przestrzeni zmiennych sterujących, co daje równomierne rozłożenie ilości informacji w otoczeniu punktu pracy procesu, co nie zawsze ma miejsce w eksperymentach biernych.

Wyniki eksperymentów służą do wyznaczenia równań regresji, przy czym można stosować klasyczną metodę najmniejszych kwadratów lub procedury minimalizacyjne.

Modele matematyczne procesów przerobczych, wykorzystywane do sterowania nimi, powinny posiadać dwie podstawowe własności: muszą być adekwatne (przy założonej granicy dokładności) oraz mieć postacie stałe w czasie



Rys. 2. Schemat blokowy sposobu sterowania dyspozytorskiego węzłem flotacji  
 Fig. 2. Block diagram of control procedure for flotation circuit

(współczynniki modeli mogą być funkcją czasu). Te cechy modeli może zapewnić kombinacja analitycznych (opartych na podstawach teoretycznych procesów) i eksperymentalnych metod ich określania. Modele dynamiki procesów, niezbędne w algorytmach sterowania automatycznego, można budować opierając się na stochastycznych równaniach różniczkowych kinetyki procesów lub określać bezpośrednio na obiekcie w trakcie eksperymentu.

W wieloletnich badaniach prowadzonych przez IPiWSM AGH w Krakowie stosowano następujące modele flotacji rud miedzi:

- a) wielomianowe i iloczynowe równania regresji,
- b) równanie o postaci

$$\hat{v} = a_1 \alpha + a_2 [P + a_3]^{-a} + a_4 [D + a_5]^{-b} + a_6 H,$$

gdzie poszczególne człony można interpretować jako:

- $a_1 \alpha$  - straty związane z charakterem rudy,
- $a_2 [P + a_3]^{-a}$  - straty związane z niewłaściwym rozdrabnianiem, przy przerobie  $P$ ,
- $a_4 [D + a_5]^{-b}$  - straty związane z niewłaściwym doбором gęstości  $D$ ,
- $a_6 H$  - zmiany wywołane doбором poziomu mętów w maszynie flotacyjnej  $H$ ,

- c) równania wywodzące się z definicji uzysku i równania kinetyki flotacji

$$\hat{v} = a \alpha^{a_1} e^{a_2 P + a_3 D + a_4 H},$$

w których  $\alpha$  - zawartość miedzi w nadawie flotacji,  $\hat{v}$  - zawartość miedzi w odpadach.

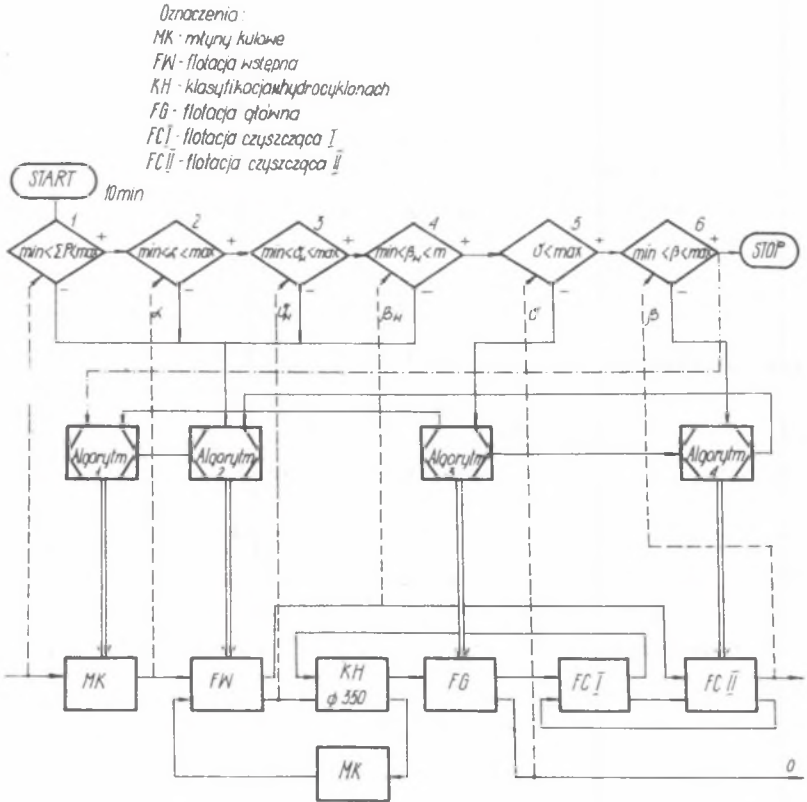
Uzyskiwane modele miały dla przeprowadzonych eksperymentów duży stopień dokładności, wykazano także ich predykcyjność, mogły więc służyć do budowy algorytmów sterowania.

Inne procesy przeróbki rud były także modelowane matematycznie, co przedstawiono w innych publikacjach.

### 3. Przykłady sterowania procesami przeróbki rud miedzi

#### 3.1. Sterowanie dyspozytorskie

Wykorzystując informacje dostarczane przez funkcjonujące w zakładzie urządzenia kontrolno-regulacyjne, a także modele uzyskane na podstawie badań i eksperymentów przemysłowych, opracowano dla zakładu wzbogacania rudy miedzi ZG "Polkowice" sposób dyspozytorskiego prowadzenia procesu



Rys. 1. Algorytm sterowania układem flotacji  
 Fig. 1. Algorithm of control for flotation circuit

technologicznego w jednym z ciągów tego zakładu. Na rysunku 1 przedstawiono uogólniony schemat tego algorytmu, ukazujący także ogólne cechy i rozwiązania stosowane w innych, konkretnych sposobach sterowania, wdrażanych w różnych zakładach przerobczych.

Przedstawiony na rysunku 1 algorytm zawiera ciąg główny - kontrolny oraz cztery interwencyjne algorytmy szczegółowe. Ciąg główny realizuje się cyklicznie przy czasie trwania cyklu odpowiadającym długości jednego cyklu pracy analizatora Courier 300, to znaczy 10 min. Wystąpienie odpowiedzi "NIE" w elementach ciągu głównego wprowadza do działania odpowiednie algorytmy szczegółowe. Realizuje się je równolegle z realizacją ciągu głównego. Na schemacie ukazano m.in. połączenia interwencyjne pomiędzy algorytmami szczegółowymi, które zaczynają funkcjonować po wyczerpaniu możliwości realizacji sterowania wg danego algorytmu szczegółowego. Algorytm zapewnia utrzymanie wartości odchyień standardowych zawartości miedzi w koncentracji końcowym i odpadach końcowych w określonych granicach.

Przy budowie omawianego algorytmu sterowania dyspozytorskiego przyjęto uproszczenia wynikające ze specyfiki procesu i możliwości operatora:

- w sposób jawny nałożono ograniczenia dotyczące zawartości składnika użytecznego tylko dla najważniejszych strumieni procesu,
- ograniczono do minimum liczbę modeli procesów wchodzących do algorytmu, a ich postacię przyjęto w możliwie dużym uproszczeniu,
- zrezygnowano ze szczegółowego określania opóźnień czasowych związanych z procesem rzeczywistym - poza ważniejszymi strumieniami - przywiązując większą wagę do cykliczności wykonywania zadań algorytmu,
- zrezygnowano z analizowania zabezpieczeń rząpi i maszyn w sensie hydraulicznym - zakładając, że są realizowane przez obsługę zgodnie z instrukcją technologiczną.

### 3.2. Dyspozytorskie sterowanie optymalizujące

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy sposobu sterowania dyspozytorskiego węzłem flotacji w ZWR "Polkowice". Rozwiązanie to oparte jest na wykorzystaniu istniejącego w zakładzie systemu gromadzenia informacji o procesie oraz wykorzystania przez dyspozytora do obliczeń - z zastosowaniem zaproponowanych procedur i programów - elektronicznej maszyny cyfrowej. Posiadane informacje, tzn. aktualne wartości parametrów procesu oraz modele obliczone na bazie zgromadzonego zbioru danych (bloki 3÷6 na schemacie), służą do formułowania i rozwiązywania zadania optymalizacji (bloki 7÷10). Rozwiązanie zadania polega na znalezieniu dopuszczalnych sterowań optymalnych (przerób ciągu, poziomy metów w maszynach flotacyjnych), których wprowadzenie zapewni przebieg procesu optymalny z punktu widzenia maksymalizacji przyjętego kryterium oceny. Jako to kryterium przyjęto uzysk miedzi w koncentracji końcowym, będący podstawowym wskaźnikiem funkcjonującego sposobu rozliczeń oraz oceny prowadzenia procesu przeróbki

rudy miedzi, z punktu widzenia wykorzystania metalu zawartego w surowcu. Do rozwiązania zadania zastosowano metodę optymalizacji statycznej. Realizuje się je okresowo w miarę otrzymywania danych o oddziaływaniach wymuszających oraz przy stwierdzeniu potrzeby jego ponownego rozwiązania, przy czym liczbowe wartości zaobserwowanych w danym momencie wymuszeń po podstawieniu do równań funkcji celu i ograniczeń odpowiednio modyfikują zadanie, dając postać zależną tylko od sterowań procesy (blok 9).

Schemat - rys. 2 - przedstawia uporządkowany zapis czynności dyspozytora. Przewidziane są trzy cykle działania:

- 24-godzinny - w którym określa się i aktualizuje niezbędne modele węzła i poszczególnych jego bloków; długość cyklu przyjęta jest na podstawie doświadczeń wynikających z poszukiwania i wyboru liczebności zbioru do obliczeń i odpowiada w przybliżeniu  $n = 166$  obserwacji;
- 2-godzinny - przyjęty jako podstawowy cykl określania - na podstawie posiadanych modeli oraz aktualnego stanu procesu - sterowań zapewniających optymalne wartości przyjętego wskaźnika oceny;
- 10-minutowy - cykl sprawdzania wartości podstawowych wskaźników oceny procesu oraz działania interwencyjnego, uruchamianego w sytuacjach niespełniania przez wartości tych wskaźników założonych dla nich wymagań; okres trwania cyklu wynika z częstotliwości napływających informacji.

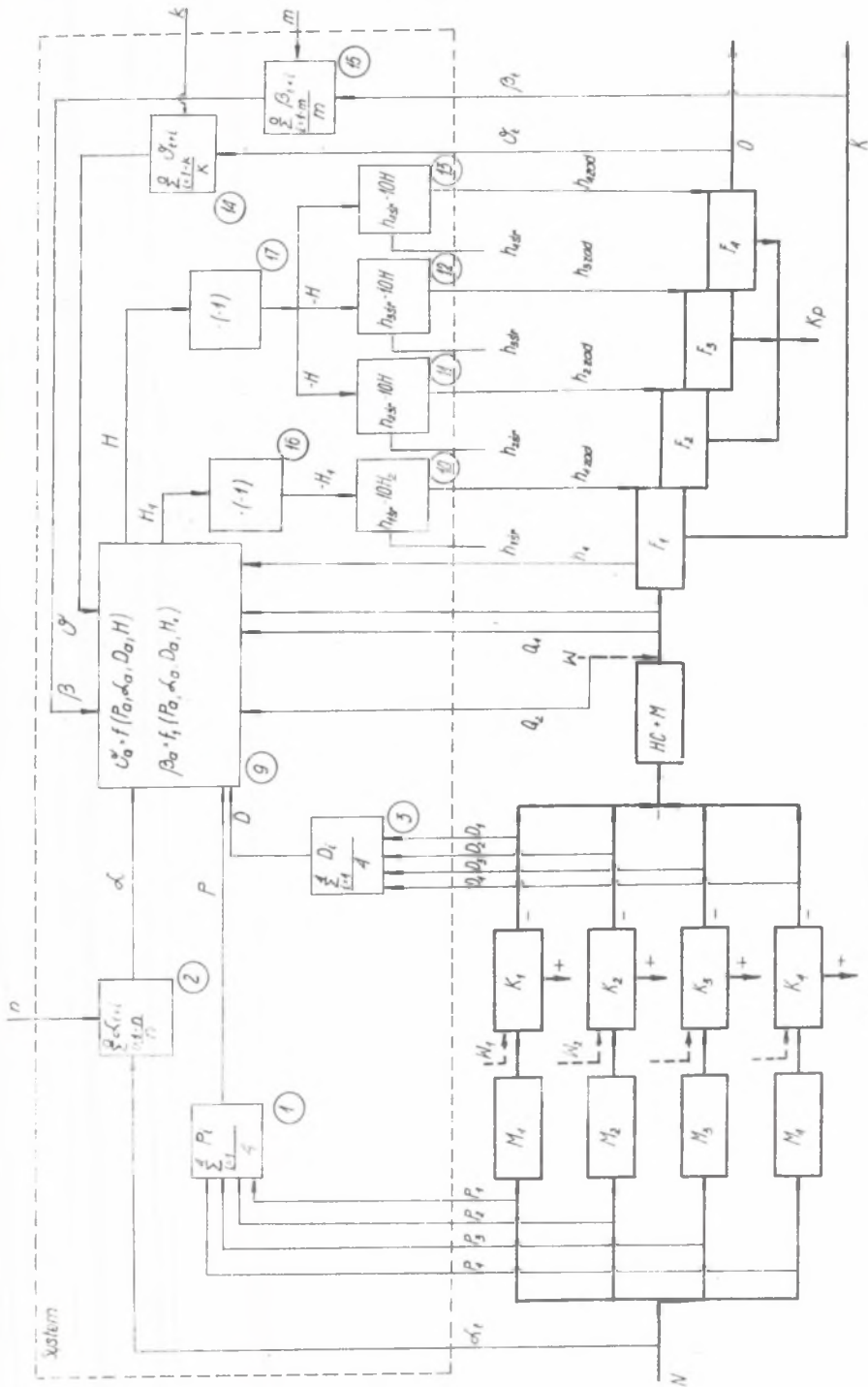
Przeprowadzona symulacja sterowania wg zaproponowanego sposobu, oparta na rzeczywistych danych przemysłowych, udowodniła wzrost efektów sterowania w postaci poprawy wskaźników oceny procesu.

### 3.3. Sterowanie automatyczne za pomocą sterownika mikroprocesorowego

Dla zakładu Wzbogacania Rudy "Rudna" zaprojektowano mikroprocesorowy system sterowania węzłem wzbogacania frakcji piaskowcowej w III i .V ciągu technologicznym (uproszczony schemat technologiczny znajduje się w dolnej części rysunku nr 3). System ten realizuje następujące podstawowe funkcje:

- bieżące zbieranie danych z wydzielonej, integralnej części procesu,
- ich udostępnianie poprzez wyświetlanie na wskaźniku cyfrowym z możliwością połączenia z innymi urządzeniami wyjściowymi,
- sterowanie procesem w układzie on-line, oparte na opracowanych modelach,
- przechowywanie danych dla określonych parametrów, w celu wykorzystania tych danych dla aktualizacji i adaptacji modeli.

Proponowana koncepcja sterowania zawiera dwie części. Jej pierwszą część stanowi sterowanie w układzie otwartym, cechujące się możliwością dynamicznej odpowiedzi na zakłócenia występujące na wejściu procesu a więc także możliwością niwelowania skutków wynikających ze zmienności wymuszeń. Na podstawie liniowego modelu regresyjnego, przy zadanych lub aktualnych wartościach wymuszeń: zawartości miedzi w nadawie, gęstość



Rys. 3. Schemat sterowania ze sprzężeniem zwrotnym

Fig. 3. Scheme of feedback control



przelewu klasyfikatorów, poziom mętów w II + IV sekcjach maszyny flotacyjnej, zawartość miedzi w odpadach, poszukiwane są sterowania w postaci poziomu przerobu - P. Proponowany system zakłada w tej części, alternatywną możliwość sterowania przerobem - P lub gęstością - D w zależności od potrzeb, a w szczególności założeń co do przerobu ciągu.

Skuteczność zaproponowanej otwartej części układu sterowania obniża brak możliwości pełnego rozpoznania własności rudy kierowanej do procesu, jak i zmienności tych własności. Występowanie w nadawie różnych typów litologicznych rudy, charakteryzujących się różną podatnością na mielenie i wzbogacanie powoduje, że parametr  $\alpha$ , pełniący rolę wymuszenia, niejednoznacznie określa własności rudy. Powyższy fakt zmusza do wprowadzenia obok sterowania w układzie otwartym, skuteczniejszego sterowania ze sprzężeniem zwrotnym.

W tej części, w procesie sterowania jakością koncentratu końcowego -  $\beta$  jako wielkość sterującą wykorzystuje się poziom mętów w pierwszej sekcji maszyny flotacyjnej -  $H_1$ , natomiast do sterowania jakością odpadów końcowych -  $\psi$  wykorzystuje się zintegrowany poziom mętów w II, III i IV sekcji maszyny - H.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowo schemat tylko drugiej części systemu - sterowania ze sprzężeniem zwrotnym.

System umożliwia wyświetlanie 100 parametrów oraz realizację nastaw 55 parametrów.

System oparty jest na sterowniku mikroprocesorowym, a konstrukcja samego sterownika na modułowym systemie PSP - Z80, wykonanym w standardzie EURO.

#### ИДЕНТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ПРЕДПРИЯТИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ РУД

#### Р е з ю м е

В статье представлено опыт получен в течение многолетних работ над моделированием и управлением некоторыми промышленными процессами переработки медной руды а также вытекающие отсюда обобщающие предложения разрешающие формулировать методические применения в этой области. Представлено примеры полученных моделей процессов переработки а также примеры систем управления некоторыми технологическими узлами предприятия переработки медной руды.

IDENTIFICATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES  
ON PLANTS OF COOPER MINERAL DRESSING

S u m m a r y

The experience from many years works which was directed to modeling and control of chosen industrial mineral processing and general conclusions, allowing to form methodical remarks, are presented in the paper.

Examples of mathematical models and control systems for chosen cooper ore processes are presented as well.