

KAZIMIERZ TRYBALSKI*

Analiza wskaźników jakości procesów przeróbczych jako kryteriów sterowania

Słowa kluczowe

Przeróbka kopalín, wskaźnik jakości, optymalizacja sterowania, flotacja, mielenie

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę wskaźników jakości procesów przeróbczych pod kątem ich użyteczności dla zadań sterowania. Podano opis przeróbczego układu technologicznego. Podano kryteria jakości stosowane w optymalizacji parametrycznej oraz dynamicznej, a także właściwości jakie powinny spełniać. Przedstawiono wymagania stawiane wskaźnikom oceny procesów przeróbczych, podano również wskaźniki oceny i funkcje celu dla wybranych procesów: flotacji i mielenia.

Wprowadzenie

Zakład przeróbczy i jego ciąg technologiczny składają się z szeregu różnorodnych procesów przeróbki kopalín. Występują one w różnych konfiguracjach w zależności od rodzaju przerabianego surowca, jak i rodzaju osiąganego produktu końcowego. Występujące w zakładach przeróbczych procesy technologiczne zachodzą według różnych praw fizycznych, fizykochemicznych oraz chemicznych, do ich opisu wykorzystywane są różne metody. Różne są także ich zadania i wskaźniki oceny, np. rozdrabnianie, oceniane jest składem ziarnowym produktu, wzbogacanie zaś — zawartością składnika użytecznego w produktach, a odwadnianie, gęstością produktu. Wymienione, przykładowe wskaźniki oceny należą do grupy wskaźników technologicznych, obok których są także wykorzystywane w ocenie procesów inne, np. ekono-

* Dr hab. inż., prof. AGH, Wydział Górniczy, Zakład Przeróbki Kopalín, Ochrony Środowiska i Utylizacji Odpadów AGH, Kraków.

miczne, termodynamiczne, ekonomiczno-technologiczne. Wskaźnikiem oceny procesu — nazywanym też często wskaźnikiem jakości, kryterium jakości, kryterium oceny, kryterium optymalności, funkcją wygody czy funkcją celu (choć w tym ostatnim określeniu zawarte jest wymaganie co do wartości) — może być jeden z parametrów wyjściowych procesu przerobczego określający: jakość otrzymywanego produktu (np. zawartość składnika użytecznego w koncentracji), ilość produktu (np. natężenie przepływu), może też być wielkość ujmująca kilka parametrów wyjściowych określających zarówno jakość, jak i ilość produktu bądź produktów (np. ilość wyprodukowanego czystego składnika użytecznego), a może też być wielkość obliczona ujmująca zarówno parametry wyjściowe oraz wejściowe procesu (np. uzysk składnika użytecznego w koncentracji).

Wskaźnik oceny procesu służy, jak nazwa wskazuje, do oceny procesu, lecz przede wszystkim jest probierzem jakości jego prowadzenia (sterowania), a w szczególności optymalizacji jego przebiegu, a więc sterowania optymalizującego ten przebieg.

Sterowanie, w powyższym ujęciu, to takie oddziaływanie na proces za pomocą dostępnych wielkości sterujących, które przy zachodzących zmianach wielkości oddziałujących na ten proces (znanych i nieznanymi) zapewnia osiągnięcie założonych parametrów wyjściowych (wskaźników oceny), a w najlepszym przypadku ich optymalizację.

Przedstawiony poniżej ogólny opis rozpatrywanego układu — przerobczego procesu technologicznego, pozwoli na jednolite podejście do wyboru wskaźnika oceny dla różnych procesów przerobczych, pozwoli także na dokonanie klasyfikacji, z punktu widzenia optymalnego sterowania procesem, różnych postaci stosowanych wskaźników. W dalszej części sformułowane zostaną wymagania w stosunku do kryteriów oceny procesów przerobczych, a także przedstawione zostaną wskaźniki oceny stosowane dla wybranych, elementarnych, technologicznych procesów przerobczych.

1. Opis układu

Jak już wspomniano, jako kryterium oceny procesu może być przyjęta jedna z wielkości wyjściowych procesu, bądź też formuła oparta na wielu różnego typu wielkościach procesu, pełniących różną rolę w stosunku do rozpatrywanego układu. Także realizacja sterowania, wynikająca z analizy wartości kryterium oceny, związana jest z uwzględnieniem rodzaju i charakteru zmiennych procesu. Dlatego też przedstawiony zostanie ścisły opis wielowymiarowego układu (Trybalski 1999), z odniesieniem do rzeczywistych, przemysłowych procesów przerobczych, rozpatrywanych jako ten układ.

Układ — w rozpatrywanym przypadku będzie nim proces lub zbiór procesów przerobczych z niezbędnymi do ich realizacji środkami technicznymi (maszyny, urządzenia, aparatura) — może być opisany zmiennymi, które — z punktu widzenia roli jaką odgrywają w stosunku do układu — można podzielić na:

1. Zmienne wejściowe (wejścia), które przedstawiają sygnały wchodzące do układu generowane w innym układzie niż badany. Do wejść zalicza się:

— sterowania $u_1(t)$, $u_2(t)$, ..., $u_p(t)$ — są to wielkości, których wartości można zmierzyć i ustalić na zadanym poziomie i które dla procesów przerobczych związane są z ilościowymi

parametrami wpływających do układu strumieni materiałowych: nadawy, odczynników flo-tacyjnych, wody, powietrza, mielników itp., oraz nastawnymi parametrami maszyn i urządzeń.

Zmienne wejściowe sterujące przedstawiane są za pomocą wektora sterowań:

$$U(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_p(t) \end{bmatrix}$$

Zbiór wszystkich możliwych wektorów sterowań $U(t)$ w chwili t tworzy przestrzeń sterowań;

— zakłócenia $z_1(t), z_2(t), \dots, z_m(t)$ — do grupy tej zalicza się wielkości, których aktualne wartości można zmierzyć, ale których zmian nie można przewidzieć, związane są one z jakościowymi cechami wpływających do układu strumieni materiałowych — są to wymuszenia; do wymuszeń — w odniesieniu do procesów przeróbczych — można między innymi zaliczyć: zawartość składnika użytecznego, wilgotność, twardość, gęstość, skład ziarnowy — w odniesieniu do nadawy, a także stężenie odczynników, twardość mielników itp. Do grupy tej zalicza się także zakłócenia niemierzalne wynikające z niedostatecznego rozpoznania mechanizmu zjawisk fizycznych zachodzących w procesach, stanu technicznego maszyn i urządzeń, a także zakłócenia dochodzące z zewnątrz i mające wpływ na przebieg procesu.

Zmienne wejściowe zakłócające przedstawiane są za pomocą wektora zakłóceń:

$$Z(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ \dots \\ z_m(t) \end{bmatrix}$$

2. Zmienne wyjściowe (wyjścia) — $y_1(t), y_2(t), \dots, y_q(t)$ — zwane też wskaźnikami jakości lub odpowiedziami. Dla procesów przeróbczych zmienne te to wielkości związane z jakościowymi i ilościowymi parametrami otrzymywanych z procesu produktów, np. zawartości składnika użytecznego w koncentracie lub odpadach, bądź wskaźniki obliczone na podstawie tych parametrów, np. straty składnika użytecznego w odpadach, stopień wzbogacenia itp.

Zmienne wyjściowe przedstawiane są za pomocą wektora wyjść (odpowiedzi):

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_q(t) \end{bmatrix}$$

Zbiór wszystkich możliwych wektorów odpowiedzi $Y(t)$ w chwili t tworzy przestrzeń odpowiedzi.

3. Zmienne stanu — $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$ — zwane też współrzędnymi stanu, opisują stan badanego układu. Zmienne opisujące stan procesów przerobczych to m.in. parametry materiałów znajdujących się wewnątrz maszyn (gęstość, skład ziarnowy, pH, flotowalność) oraz parametry ilościowe i jakościowe strumieni wewnątrzoperacyjnych układu (wielkość zawrotów materiałowych, natężenie przepływu produktów między komorami maszyny flotacyjnej itp.).

Zmienne stanu opisywane są za pomocą wektora stanu:

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dots \\ x_n(t) \end{bmatrix}$$

a zbiór wszystkich możliwych wektorów stanu $X(t)$ w chwili t tworzy przestrzeń stanów układu. Jako zmienne stanu (składowe wektora stanu) wybierana jest najmniejsza liczba wielkości, które opisują w każdej chwili stan danego układu. Wybór zmiennych stanu nie jest jednoznacznie określony, tzn. że dla danego układu zmienne stanu mogą być wybrane w różny sposób.

Przedstawiony opis układu, oparty na pojęciu zmiennych stanu, może być wykorzystany do opisu procesów. W takim przypadku jednakże konieczna jest znajomość struktury wewnętrznej i charakterystyk przebiegu procesów.

Bardziej rozpowszechnione i łatwiejsze w praktycznym zastosowaniu do opisu właściwości (dynamicznych) układów są metody nie uwzględniające wewnętrznego stanu układu i zachodzących w nim procesów, a tylko badające relacje wejście — wyjście. Do metod tych należy opis wiążący wektor wejść z wektorem wyjść za pomocą równań różniczkowych, transmitancji i funkcji przejścia.

2. Kryteria jakości sterowania

Kryterium jakości służy do oceny przebiegu procesu technologicznego, jednak główny obszar jego wykorzystania to optymalizacja parametryczna procesu lub sterowanie optymalne tym procesem. W takich też dwu grupach przedstawione zostaną różne postacie kryteriów jakości, przy czym postacie te mają charakter ogólny, w szczególnych przypadkach dotyczących procesów przeróbki surowców mineralnych, w miejsce odpowiednich sygnałów (wyjściowych, wejściowych) występujących w formułach wskaźników należy podstawić odpowiednie wielkości związane z rozpatrywanymi procesami przerobczymi. Zestawienie wskaźników, które mogą być wykorzystane w tym zakresie — dla wybranych procesów przerobczych — przedstawiono w dalszej części opracowania (rozdz. 4).

2.1. Optymalizacja parametryczna

Optymalizacja parametryczna obejmuje zagadnienia, w których należy wyznaczyć optymalne wartości parametrów wchodzących do opisu układu. Optymalność układu można roz-

patrywać z różnych punktów widzenia (Górecki 1993), jednak zawsze zasadniczą sprawą jest określenie i sprecyzowanie matematycznej postaci funkcji celu. Zwykle wymaga się, by układ z jednej strony możliwie wiernie odtwarzał zadane wartości wielkości wzorcowej (wskaźnika oceny), z drugiej zaś, by tenże sam układ był w miarę możliwości niewrażliwy na sygnały niepożądane, zakłócające jego normalną pracę. Optymalizacja związana jest więc nie z jedną, lecz z wieloma funkcjami celu, czyli z optymalizacją wektorową.

Wymagania powyższe są na ogół sprzeczne, ich spełnienie wiąże się zwykle z pewnym kompromisem. Efektem kompromisu może być sformułowanie jednej funkcji celu, pozostałe sprowadzając do jej ograniczeń. Takie rozwiązanie zapewnia wprawdzie prostotę obliczeń, nie zawsze jednak jest do przyjęcia, dlatego też problemy z wieloma funkcjami celu najczęściej są formułowane i rozwiązywane jako zadania polioptymalizacji.

Optymalizacja parametrów może opierać się bądź na sygnałach w dziedzinie czasu, bądź też na transformatach tych sygnałów w dziedzinie zmiennej Laplace'a s , lub też Fouriera $j\omega$.

W optymalizacji parametrycznej wyróżnia się dwie postacie wskaźników oceny pełniących funkcję miary jakości systemu.

1. Jako miarę jakości systemu stosować można kryterium całki z uchybu dynamicznego

$$J_1 = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) dt \quad (1)$$

gdzie:

$\varepsilon(t) = y_u(t) - y(t)$ — jest uchybem dynamicznym,

w którym:

$y_u(t)$ — jest sygnałem wyjściowym w stanie ustalonym,

$y(t)$ — jest sygnałem wyjściowym w stanie dynamicznym.

Kryterium to ma ograniczoną stosowalność z uwagi na możliwość zmiany jego znaku, podczas gdy miara jakości musi być funkcją zachowującą stały znak.

Powyzszą całkę (kryterium J_1) można łatwo obliczyć znając transformatę Laplace'a $E(s)$ uchybu $\varepsilon(t)$, przy czym możliwe to jest wtedy, gdy uchyb dynamiczny jest podany w postaci jawnej funkcji czasu.

Transformata ta ma postać:

$$E(s) = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) e^{-st} dt \quad (2)$$

Uwzględniając to mamy:

$$J_1 = \lim_{s \rightarrow 0} \int_0^{\infty} \varepsilon(t) e^{-st} dt = \lim_{s \rightarrow 0} E(s) = E(0) \quad (3)$$

Tak więc

$$J_1 = E(0) \quad (4)$$

kryterium całki z uchybu dynamicznego jest równe operatorowej granicznej wartości tego uchybu dla zmiennej $s = 0$.

2. Kryterium całki z kwadratu uchybu dynamicznego
Kryterium to definiuje się następująco:

$$J_2 = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt \quad (5)$$

To powszechnie stosowane kryterium nie ma oczywiście ograniczeń związanych ze zmiennością znaku uchybu.

Jeżeli istnieje transformata Laplace'a $E(s)$ funkcji $\varepsilon(t)$, to kryterium J_2 można obliczyć ze wzoru (twierdzenie Parsewala):

$$J_2 = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} E(s)E(-s) ds \quad (6)$$

Natomiast w przypadku istnienia transformaty widmowej funkcji uchybu kryterium to można obliczyć według zależności (twierdzenie Raleigha):

$$J_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |E(j\omega)|^2 d\omega \quad (7)$$

2.2. Optymalizacja dynamiczna

Terminem optymalizacja dynamiczna określane jest sterowanie optymalne, tzn. takie sterowanie procesem, w którym przyjęty wskaźnik oceny procesu osiąga wartość minimalną lub maksymalną zależnie od tego, czy pożądana jest jego mała czy duża wartość. Wskaźnik ten nazywany jest najczęściej funkcją celu lub kryterium optymalności. W ogólnym przypadku można powiedzieć, że celem sterowania jest osiągnięcie maksimum zysków lub minimum strat przy przejściu procesu ze stanu początkowego do stanu pożądanego.

W zagadnieniach przeróbki surowców mineralnych jako koszt — minimalizujący straty — może występować zużycie energii, paliwa, materiałów, surowca, długość czasu potrzebnego do realizacji procesu technologicznego itp.

Formułując problem sterowania optymalnego (Górecki 1993) prawie zawsze mamy do czynienia z zagadnieniem ekstremum pewnego funkcjonału. Funkcja celu (wskaźnik opty-

malności) jest najczęściej pewnym funkcjonałem zależnym od wektora stanu $X(t)$, od wektora sterującego $U(t)$ oraz od pewnego wektora $Z(t)$ reprezentującego stopień niewiedzy w odniesieniu do mechanizmu zjawisk fizycznych zachodzących w rzeczywistym procesie i zmiany jego parametrów, klasy i wartości sygnałów zakłócających (wewnętrznych) oraz dochodzących z zewnątrz układu.

Do najczęściej stosowanych wskaźników jakości sterowania optymalnego w przypadku procesów ciągłych należą następujące funkcjonały:

1.

$$F_1(x, u) = \max_{t_0 \leq t \leq t_1} \|g(t) - x(t)\| \quad (8)$$

Wskaźnik ten wykorzystywany jest do poszukiwania sterowania optymalnego $u(t)$, które minimalizuje powyższy funkcjonał, tzn. zapewnia taką realizację procesu, w której maksymalne odchylenie wektora stanu $X(t)$ od jego wartości zadanej $G(t)$ jest najmniejsze.

Funkcja celu przedstawia się więc następująco:

$$\min F_1(x, u) = \min \max_{t_0 \leq t \leq t_1} \|g(t) - x(t)\| \quad (9)$$

2.

$$F_2(x, u) = \int_0^T F[x(t), u(t)] dt \quad (10)$$

Warunkiem optymalności sterowania w tym przypadku jest zapewnienie najmniejszej wartości funkcjonału, zatem funkcja celu ma postać:

$$\min F_2(x, u) = \min \int_0^T F[x(t), u(t)] dt \quad (11)$$

W szczególnym przypadku, jeżeli $F(x, u) \equiv 1$, powyższe zagadnienie poszukiwania sterowania optymalnego sprowadza się do znalezienia minimalnego czasu $T - t_0$ realizacji procesu; jest to tzw. problem czasowo-optymalny.

3. Czasem wskaźnik jakości sterowania optymalnego przyjmuje się w postaci:

$$F_3(x, u) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \|f(t) - x(t)\|^2 dt \quad (12)$$

i poszukuje się sterowania minimalizującego ten funkcjonał.

Jak widać z powyżej przedstawionych postaci wskaźników jakości i funkcji celu, przy formułowaniu problemu sterowania optymalnego zawsze występuje zagadnienie poszukiwania ekstremum pewnego funkcjonału.

3. Niezbędne właściwości kryteriów jakości

Skuteczność optymalizacji przebiegu procesu zależy nie tylko od postaci przyjętego kryterium jakości sterowania, nie tylko od rodzaju parametrów technologicznych ujętych w kryterium, ale także — w znacznej mierze — od właściwości i cech tych parametrów (wskaźników).

Kryteria jakości powinny posiadać następujące właściwości i cechy oraz powinny spełniać warunki:

- odzwierciedlać cel sterowania,
- winny być przedstawiane zależnościami ilościowymi,
- wartości liczbowe kryterium powinny równomiernie rozkładać się w całym przedziale zmienności kryterium,
- wartości liczbowe kryterium winny być jednoznacznie związane z zależnością określającą zmiany regulowanych parametrów procesu,
- dla danego procesu struktura matematyczna kryterium powinna być uniwersalna, zmianom mogą ulegać tylko współczynniki kryterium,
- formuła kryterium powinna być określona zależnością, którą można wykorzystać do syntezy algorytmu regulacji,
- kryterium powinno zawierać zmienne, które bezpośrednio przedstawiają fizyczne parametry procesu, a system sterowania i algorytm sterowania winny zapewniać bezpośredni wpływ sterujący na te parametry,
- kryterium powinno wynikać z funkcji celu posiadającej ekstremum,
- kryterium powinno odpowiadać wymaganiom czułości, nawet niewielkie zmiany wartości parametrów wchodzących do formuły kryterium winny powodować zauważalne zmiany wartości kryterium, a tym zmianom kryterium powinny odpowiadać realne zakresy zmian wartości parametrów sterujących,
- kryterium powinno być efektywne w pobliżu punktu optimum i w przedziale niewielkich odchyień od tego punktu.

4. Wskaźniki oceny przemysłowych procesów przeróbczych

Procesy przeróbcze, jak już wspomniano, są różnorodne, zachodzą one według różnych praw fizycznych, fizykochemicznych oraz chemicznych. Można je ogólnie podzielić na dwie główne grupy: procesy rozdzielcze i nierozdzielcze. Procesy rozdzielcze, do których zaliczane są m.in. wszystkie procesy wzbogacania, charakteryzują się tym, że ich efektem są dwa (lub więcej) produkty końcowe, z których każdy opisywany jest szeregiem różnych parametrów. Fakt ten utrudnia ocenę procesu rozdzielczego, komplikuje określenie jednego kryterium oceny oraz sformułowanie funkcji celu optymalizacji procesu. Wskaźnik oceny w takim przypadku musi uwzględniać niekiedy przeciwstawne, cząstkowe kryteria oceny, a jako funkcja celu powstaje funkcja złożona będąca pewnym kompromisem uwzględniającym różne wymagania. Czasem wręcz niemożliwe jest osiągnięcie tego kompromisu poprzez ustalenie jednego kryterium i problem może być rozwiązany jedynie jako wielokryterialny, charakteryzowany wieloma funkcjami celu — jego rozwiązanie jest nazywane polioptymalizacją.

Kryteria oceny procesów wzbogacania — głównej podgrupy przeróbczych procesów rozdzielczych — obok ogólnych właściwości kryteriów sformułowanych w rozdziale 3, powinny charakteryzować się także właściwościami wynikającymi ze specyfiki tych procesów przeróbczych (Sorokier, Szwidienko 1979).

Można tu wymienić następujące wymagania w stosunku do kryteriów oceny tych procesów:

1. Kryterium efektywności przeróbczego procesu rozdzielczego powinno być związane z charakterystyką nadawy α w szczególności z wartością zawartości składnika użytecznego w nadawie α .

2. Wartość kryterium powinna wzrastać ze wzrostem zawartości składnika użytecznego w koncentracie β oraz maleć ze wzrostem zawartości składnika użytecznego w odpadach ϑ .

3. Wartość kryterium powinna wzrastać ze wzrostem wychodu koncentratu γ .

4. Kryterium powinno osiągać ekstremum w punkcie $\beta = 1 - \vartheta$, tzn. przy równych warunkach przechodzenia składnika użytecznego do koncentratu i skały płonnej do odpadów.

4.1. Wskaźniki oceny i funkcja celu dla flotacji

Jako przykład rozdzielczego procesu przeróbczego omówiony zostanie proces flotacji.

Parametry przebiegającej w warunkach przemysłowych flotacji — fizykochemicznego procesu wzbogacania — w zależności od funkcji jaką pełnią w stosunku do rozpatrywanego układu, ale przede wszystkim w zależności od funkcji jaką pełnią w sterowaniu wielowymiarowym procesem — można rozpatrywać jako składowe określonych wektorów. Wektory te to:

— wymuszenia W o składowych:

- natężenie przepływu nadawy,
- skład ziarnowy nadawy,
- gęstość nadawy (wypadkowa gęstości fazy stałej i ciekłej zawiesiny oraz koncentracji fazy stałej w tej zawieszynie),
- zawartość składnika użytecznego w nadawie;

— sterowania U o składowych:

- natężenie przepływu odczynnika (odczynników),
- natężenie przepływu powietrza do aeracji,
- położenie zasuw w puszcze odpadowej,
- położenie zasuw w rozdzielaczu nadawy,
- prędkość obrotowa wirników,
- częstotliwość pracy zgarniaczy piany;

— zakłócenia Z o składowych:

- skład wody,
- jakość odczynnika (odczynników),
- stabilność piany,
- rozmiary pęcherzyków powietrza,
- charakterystyka aeracji,
- czas trwania flotacji,
- stan techniczny maszyny flotacyjnej i urządzeń wyposażenia;

- stanu X o składowych:
 - stężenie odczynnika (odczynników) w mętach,
 - temperatura mętów,
 - pH mętów,
 - gęstość mętów,
 - poziom mętów w maszynie,
 - grubość warstwy piany,
 - kolor piany,
 - zawartości składnika użytecznego w produktach przejściowych;
- wyjścia Y o składowych:
 - zawartość składnika użytecznego w koncentracie,
 - zawartość składnika użytecznego w odpadach,
 - natężenie przepływu koncentratu,
 - natężenie przepływu odpadów,
 - gęstość koncentratu,
 - gęstość odpadów.

Taki podział zmiennych procesu nie jest jedyny, jednoznaczny i rozłączny. Parametry mogą być przypisane do różnych wektorów w zależności od rodzaju wzbogacanego surowca, zastosowanej technologii, konstrukcji maszyny flotacyjnej i wreszcie od systemu kontroli parametrów procesu, tzn. od tego, czy pomiarowe środki techniczne umożliwiają, w danych warunkach zakładu przerobczego, pomiar parametru, a także czy środki techniczne (układy regulacji) umożliwiają wprowadzenie określonego sterowania do procesu.

Istniejący w zakładzie przerobczym system kontroli determinuje także wybór wskaźnika oceny procesu.

Do oceny technologicznych procesów flotacji wykorzystywane są wprost same technologiczne parametry flotacji lub też wskaźniki określone na ich podstawie (Sorokier, Szwidienko 1979; Trop i in. 1986).

Główne, najczęściej wykorzystywane wskaźniki to:

β — zawartość składnika użytecznego w koncentracie,

ϑ — zawartość składnika użytecznego w odpadach,

$\varepsilon = \frac{\alpha - \vartheta}{\beta - \vartheta} \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot 100$ — uzysk składnika użytecznego w koncentracie, ujmujący obok para-

metrów wyjściowych (β , ϑ) także jakość nadawy α (zawartość składnika użytecznego w nadawie), będącą wymuszeniem procesu,

$E = \frac{\beta}{\vartheta}$ — efektywność rozdziału,

$S = \frac{\varepsilon(1-R)}{R(1-\varepsilon)}$ — współczynnik selektywności rozdziału, gdzie $R = \frac{\gamma(1-\beta)}{1-\alpha}$ oznacza uzysk

części nieużytecznych w koncentracie, a γ oznacza wychód koncentratu, który można określić

$$\gamma = 100 \frac{\alpha - \vartheta}{\beta - \vartheta}.$$

W literaturze problemu podawanych jest wiele technologicznych wskaźników oceny dla procesów wzbogacania, a wszystkie one w zasadzie oparte są na parametrach technologicznych α , β , ϑ , ε i większość z nich wywodzi się od podanych powyżej pięciu głównych wskaźników lub też może być w nie przekształcona.

Analiza podanych wskaźników jakości pod względem wymienionych w początkowej części rozdziału właściwości, którymi powinny się cechować wskazuje, że nie wszystkie wskaźniki spełniają stawiane warunki. Uzysk, przyjmowany bardzo często w warunkach przemysłowych procesów wzbogacania jako wskaźnik oceny, nie może być samodzielnym kryterium (wysoki uzysk może oznaczać niską zawartość β), lecz z dodatkowymi warunkami nałożonymi na wartość innych wskaźników (zawartość składnika użytecznego w koncentracie β). Natomiast wskaźniki E i S nie spełniają warunku zależności od jakości nadawy α .

Cztery z podanych powyżej kryteriów, które można uważać za pierwotne, są dość silnie związane z zawartością składnika użytecznego w odpadach (ϑ). Biorąc pod uwagę łatwość i bezpośredniość pomiaru tego parametru, może on być także wykorzystywany jako lokalne kryterium jakości procesu flotacji.

Sformułowanie funkcji celu sterowania z wykorzystaniem tylko jednego wskaźnika oceny, jak już wspomniano, jest trudne dla procesów rozdzielczych. Dlatego też najczęściej funkcja celu formułowana jest jako ekstremum jednego wskaźnika, pozostałe zaś traktowane są jako równościowe i nierównościowe ograniczenia. Przy istnieniu kilku wskaźników oceny procesu istnieje wiele możliwości wyboru funkcji celu, przy czym trudne jest określenie, która z nich jest najlepsza. Podstawowym problemem jest zatem właściwy wybór funkcji celu.

Przy wykorzystaniu tylko trzech podstawowych technologicznych wskaźników oceny procesu flotacji β , ϑ i ε zadanie wyboru funkcji celu może być postawione m.in. następująco (Trybalski 1985):

$$1. \max \varepsilon, \quad \beta \geq \beta_z \quad (13)$$

$$2. \min \vartheta, \quad \beta = \beta_z$$

$$3. \max \varepsilon, \quad \beta = \beta_z$$

$$4. \max \beta, \quad \varepsilon = \varepsilon_z$$

gdzie:

β_z , ε_z — wartości zadane β , ε .

Często w warunkach przemysłowych jako kryterium prowadzenia procesu flotacji przyjmuje się wariant drugi bądź trzeci. Stała jakość koncentratu β jest wymogiem narzuconym przez hutę. Maksymalizacja uzysku (wariant 1 i 3) nie zawsze zabezpiecza osiągnięcie najlepszych wskaźników procesu. Uzysk jest funkcją nie tylko β , ale i zawartości składnika użytecznego w nadawie α , a dla różnych wartości α funkcje zależności ε od β ($\varepsilon = f(\beta)$) są różne, posiadając ekstrema w różnych punktach.

Z powyższych rozważań widać, jak trudny i ważny jest wybór funkcji celu dla danego procesu — jest to podstawowy problem formułowania zadania optymalizacji. Formułując je, należy wziąć pod uwagę także to — co komplikuje dodatkowo problem — że wskaźniki oceny technologicznych procesów przeróbki surowców mineralnych jako obiektów optymalizacji, mogą przyjmować różną postać, w zależności od usytuowania tych obiektów w hierarchicznej strukturze schematu technologicznego lub całego zakładu przerobczego, a także mogą być różne dla tych samych procesów zastosowanych do wzbogacania różnych surowców mineralnych.

4.2. Wybór funkcji celu dla mielenia

Do nierozdzielczych procesów przerobczych zalicza się proces mielenia, stosowany często w zakładach przeróbki rud do przygotowania (rozdrobienia) nadawy do procesów wzbogacania (najczęściej flotacyjnego). Proces mielenia w takim ujęciu najczęściej przebiega na mokro z dodatkiem strumienia wody do młyna.

Jako przykład wyboru funkcji celu sterowania i sformułowania zadania optymalizacji dla jednostkowego technologicznego procesu mielenia podane zostaną trzy warianty takiego wyboru (Trybalski 1996). Nie są to oczywiście wszystkie możliwości w tym zakresie.

Wariant I

Minimalizowany jest udział (wychód γ) ziaren dużych ($> d$) w produkcji mielenia, przy obustronnych ograniczeniach nierównościowych nałożonych na masowe natężenie przepływu rudy do młyna oraz objętościowe natężenie przepływu wody do młyna, przy nierównościowym ograniczeniu od góry nałożonym na temperaturę łożysk młyna oraz przy ograniczeniach równościowych określających wymagania co do gęstości wylewu młyna i określających masę mielników we młynie. W wariacie tym niezbędna jest znajomość wybranych zależności funkcyjnych pomiędzy parametrami procesu.

$$\begin{aligned} \min \gamma_{+d} & & (14) \\ F_{\max} & \geq F \geq F_{\min} \\ F_{w,\max} & \geq F_w \geq F_{w,\min} \\ D & = D_{\text{zad}} \\ Q_k & = Q_{k,\text{zad}} \\ T & < T_{\text{dop.}} \end{aligned}$$

gdzie:

$$\gamma_{+d} = f_1(F, F_w, D, Q_k)$$

$$F = f_2(F_w)$$

$$D = f_3(F, F_w)$$

$$T = f_4(F, F_w, Q_k)$$

a poszczególne symbole oznaczają:

γ_{+d} — wychód klasy ziarnowej o ziarnach większych od d w produkcji mielenia,

- F — masowe natężenie przepływu rudy do młyna,
 F_w — objętościowe natężenie przepływu wody do młyna,
 D — gęstość wylewu młyna,
 Q_k — masa mielników,
 T — temperatura łożysk młyna,
 \max, \min — wartość maksymalna i minimalna parametru,
 zad. — wartość zadana parametru,
 dop. — wartość dopuszczalna parametru.

Pozostałe dwa warianty w zapisie matematycznym mają postacie przedstawione poniżej.

Wariant II

$$\begin{aligned}
 & \max J & (15) \\
 & \gamma_{+d} = \gamma_{+d,\text{zad}} \\
 & F_{\max} \geq F \geq F_{\min} \\
 & F_{w,\max} \geq F_w \geq F_{w,\min} \\
 & D = D_{\text{zad}} \\
 & Q_k = Q_{k,\text{zad}} \\
 & T < T_{\text{dop.}}
 \end{aligned}$$

gdzie:

$$J = f_1(F, F_w, Q_k)$$

$$\gamma_{+d} = f_2(F, F_w, D, Q_k)$$

$$F = f_3(F_w)$$

$$D = f_4(F, F_w)$$

$$T = f_5(J)$$

przy czym:

J — moc pobierana przez silnik młyna.

Wariant III

$$\begin{aligned}
 & \max F_{Pr} & (16) \\
 & \gamma_{+d} \leq \gamma_{+d,\text{dop.}} \\
 & F_{\max} \geq F \geq F_{\min} \\
 & F_{w,\max} \geq F_w \geq F_{w,\min} \\
 & D = D_{\text{zad}} \\
 & Q_k = Q_{k,\text{zad}} \\
 & T < T_{\text{dop.}}
 \end{aligned}$$

gdzie:

$$F_{Pr} = f_1(F, F_w, D, Q_k)$$

$$\gamma_{+d} = f_2(F, F_w, \gamma_{+d_1, N}, Q_k)$$

$$F = f_3(F_w)$$

$$D = f_4(F, F_w)$$

$$Q_k = f_5(\gamma_{+d_1, N})$$

$$T = f_6(F, F_w, Q_k)$$

przy czym:

F_{Pr} — objętościowe natężenie przepływu produktu mielenia,

$\gamma_{+d_1, N}$ — wychód klasy ziarnowej o ziarnach większych od d_1 w nadawie do młyna.

Jak już powiedziano, wybór jednego z wariantów jest trudny i uwarunkowany z jednej strony miejscem i zadaniem mielenia w całym schemacie technologicznym, z drugiej zaś możliwościami pomiarowymi i możliwościami technicznymi wpływania na proces (układy regulacji). Możliwości pomiarowe w znacznym stopniu determinują też możliwości uzyskania zależności funkcyjnych (modeli) poszczególnych parametrów i wskaźnika od innych parametrów procesu.

Podsumowanie

Sterowanie procesem technologicznym realizujące optymalizację parametryczną czy też optymalizację dynamiczną oparte jest na wykorzystaniu pewnych kryteriów jakości sterowania. Kryteria te mają charakter uniwersalny dla różnych obiektów sterowanych, muszą jednak spełniać określone wymagania. W przypadku sterowania procesami przeróbczymi do kryteriów tych włączane są specjalistyczne wskaźniki stosowane w ocenie procesów przeróbczych. Wskaźników tych jest bardzo dużo, zależą one od rodzaju i specyfiki procesu, jednak można je wszystkie sprowadzić do podstawowego kanonu wskaźników najważniejszych. Zadania optymalizacji dla procesów przeróbczych można formułować wielowariantowo, o czym decyduje wspomniana duża ilość wskaźników oceny, ich różnorodność, a także różny charakter samych procesów.

Pracę przygotowano w ramach grantu nr 9 T12A 032 19

LITERATURA

- Górecki H., 1993 — Optymalizacja systemów dynamicznych. PWN, Warszawa.
 Sorokier L.W., Szwidienko A.A., 1979 — Uprawlenie parametrami flotacji. Niedra, Moskwa.
 Trop A.E., Kozin W.Z., Prokofiew E.W., 1986 — Awtomatyczeskoe upravlenie ticchnologičeskimi procesami obogatitielnych fabrik. Niedra, Moskwa.

- Trybalski K., 1999 — Analiza właściwości dynamicznych procesów i układów technologicznych przeróbki surowców mineralnych. Rozprawy, monografie nr 85, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Trybalski K., 1985 — Optymalizacja przebiegu oraz prowadzenie procesu technologicznego w węzle flotacji rudy miedzi na przykładzie ZWR ZG „Polkowice”. Rozprawa doktorska AGH. Kraków.
- Trybalski K., 1996 — Optymalizacja w przeróbce kopalin. Archives of Mining Sciences Vol. 41, s. 371—392.

KAZIMIERZ TRYBALSKI

THE ANALYSIS OF QUALITY INDEXES OF MINERAL PROCESSES TREATED AS CONTROL CRITERIONS

Key words

Mineral processing, quality index, control optimization, flotation, milling

Abstract

The analysis of quality indexes of mineral processes from the perspective of their utility for controlling tasks has been presented in the article. The description of a processing technological structure has been given. Quality criterions used in the parametrical and dynamical optimization have been given as well as properties which they shall fulfilled. Requirements for appreciation indexes of mineral processes were presented and appreciation indexes and goal functions for selected processes (flotation and milling) were given.