

Kazimierz TRYBALSKI
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

BADANIA SYMULACYJNE UKŁADÓW TECHNOLOGICZNYCH PRZERÓBKI KOPALIN

Streszczenie. W referacie zastosowano program symulacyjny, wykorzystujący metody schematów blokowych i modeli transmitancyjnych, do analizy właściwości dynamicznych układów złożonych z kilku operacji technologicznych. W ten sposób przebadano zamknięty układ młyn – klasyfikator – młyn. Analizę przeprowadzono dla danych uzyskanych w trakcie eksperymentów przemysłowych zrealizowanych w zakładach wzbogacania rud miedzi.

SIMULATION INVESTIGATIONS OF MINERAL PROCESSING TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Summary. The simulation software, which uses methods of block diagrams and transmittance models for analysis of dynamic properties of systems composed of several technological operations, was presented in this paper. The mill-classifier-mill closed system was studied using this method. The analysis was made for data obtained during industrial experiments which were carried out on copper ore enrichment plants.

1. Wstęp

Ciąg technologiczny zakładu przerobczego składa się z szeregu różnorodnych procesów przeróbki kopaliny. Występują one w różnych konfiguracjach w zależności od rodzaju przetwarzanego surowca, jak i rodzaju osiąganego produktu końcowego. Układ technologiczny zakładu przerobczego jest skomplikowany, można wyróżnić w nim między innymi zawroty materiału z operacji dalej usytuowanych w układzie do operacji wcześniejszych (materiałowe sprzężenie zwrotne). Węzłami technologicznymi zawierającymi materiałowe sprzężenia zwrotne są m.in. węzły: „mielenie – klasyfikacja – domielanie” oraz flotacja z jej układami czyszczeń koncentratu.

Procesy technologiczne występujące w zakładach przerobczych mają różnorodny charakter, różne są ich zadania i wskaźniki oceny, np. rozdrabnianie - oceniane jest składem ziarnowym produktu, wzbogacanie – zawartością składnika użytecznego w produktach, a odwadnianie – gęstością produktu.

Złożoność i różnorodność procesów i schematów technologicznych przeróbki surowców mineralnych jest przyczyną trudności ich analizy i oceny. Brak jednolitego opisu zjawisk zachodzących w procesach przerobczych zmusza do poszukiwania różnych metod w tym zakresie.

Duże możliwości w badaniach i analizie złożonych procesów i schematów technologicznych dają metody symulacyjne. Programy symulacyjne dają wielkie możliwości przebadania obiektów, w zakresach często niemożliwych do ustalenia w rzeczywistych zakładach przerobczych czy laboratoriach badawczych. Badanie symulacyjne nie wiąże się z, wysokimi często, kosztami wynikającymi z drogiego eksperymentów przemysłowych oraz nie powoduje zakłócenia rzeczywistego procesu. Metody symulacyjne mogą być stosowane zarówno do badania zachowania się poszczególnych procesów i maszyn, ale także do projektowania technologii, schematów technologicznych czy całych zakładów przerobczych.

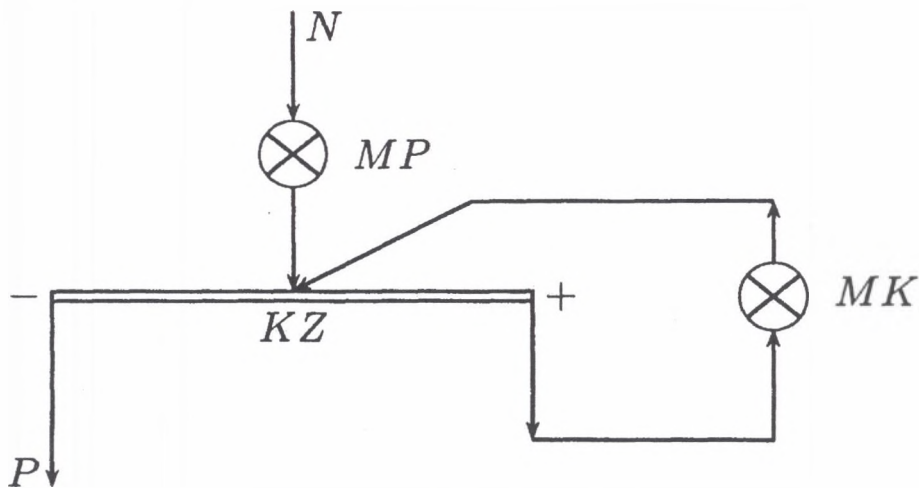
Metoda symulacyjna, powiązana z wykorzystaniem schematów blokowych i związanych z nimi modeli transmitancyjnych [1,2,3,4,5,7,12], pozwala na opis i analizę właściwości dynamicznych, ale daje też możliwość określenia punktów pracy w stanie ustalonym, różnych technologicznych procesów przerobczych. Jest to metoda uniwersalna szeroko wykorzystywana w innych działach techniki.

Znajomość właściwości dynamicznych poszczególnych elementów oraz znajomość zasad łączenia bloków daje możliwość określenia właściwości dynamicznych całego układu. Schematy blokowe pozwalają także na prześledzenie przepływu sygnałów przez cały układ oraz przez jego poszczególne elementy. Charakter zmiany sygnału przy jego przejściu przez każdy z elementów pokazuje postać transmitancji przypisanej temu elementowi.

W pracy przedstawiono wyniki symulacyjnej analizy właściwości dynamicznych jednego z często występujących w zakładach przeróbki rud układu technologicznego przygotowania surowca, zwanego zamkniętym układem młyn – klasyfikator – młyn.

2. Opis zamkniętego układu młyn - klasyfikator - młyn

Schemat technologiczny układu zamkniętego młyn - klasyfikator - młyn przedstawiono na rysunku 1. W skład rozpatrywanego układu wchodzi: młyn prętowy (MP) – jego zadaniem jest zmielenie rudy (nadawy) kierowanej do niego, klasyfikator zwojowy (KZ) – jego zadaniem jest wydzielenie ze zmielonej w młynie prętowym rudy drobnych klas ziarnowych (przelew klasyfikatora), które kierowane są do flotacji, oraz grubych klas ziarnowych (wylew klasyfikatora), które podlegają dalszemu domielaniu, oraz młyn kulowy (MK) – którego zadaniem jest domielenie wyodrębnionego wylewu klasyfikatora. Wylew młyna domielającego kierowany jest ponownie do tego samego klasyfikatora zwojowego, który pełni rolę kontrolną w stosunku do młyna domielającego. W układzie tym występuje więc zawrót i krążenie części surowca w części układu, obejmującej klasyfikator zwojowy i młyn kulowy.



Rys 1. Schemat technologiczny zamkniętego układu młyn – klasyfikator – młyn
 Fig. 1. Technology diagram of closed mill-classifier-mill system

Tego typu układy występują powszechnie w zakładach przeróbki rud. Układ taki, jako typowy układ z materiałowym sprzężeniem zwrotnym, poddano analizie, określając jego właściwości dynamiczne. Sprzężenia takie występują w zakładach przerobczych, najczęściej w węzłach mielenia i klasyfikacji oraz flotacji.

Rozpatrywany układ można scharakteryzować następującymi wielkościami:

wielkości wejściowe:

- masowe natężenie przepływu rudy do młyna prętowego,
- objętościowe natężenie dopływu wody do młyna prętowego,
- skład ziarnowy nadawy,
- masa mielników w młynie prętowym,
- objętościowe natężenie dopływu wody do klasyfikatora,
- wysokość progu przelewowego klasyfikatora,
- masa mielników w młynie kulowym

wielkości wyjściowe:

- skład ziarnowy przelewu klasyfikatora,
- gęstość przelewu klasyfikatora,
- objętościowe natężenie przepływu przelewu klasyfikatora.

Odpowiadający schematowi technologicznemu schemat blokowy ma postać jak na rysunku 2. Występujące w schemacie transmitancje oznaczają:

G_{MP} - transmitancję młyna prętowego,

$G_{P,KZ}, G_{W,KZ}$ - transmitancje odpowiednio: toru przelewowego i toru wylewowego klasyfikatora zwojowego,

G_{MK} - transmitancję młyna kulowego,

G_T - transmitancję transportu wylewu klasyfikatora do młyna kulowego,

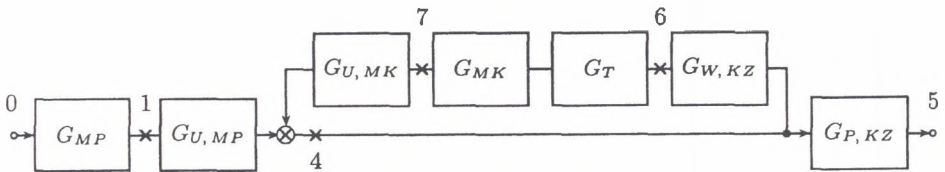
$G_{U,MP}, G_{U,MK}$ - transmitancje udziału (podane w postaci ułamka) sumowanych na wejściu do klasyfikatora strumieni wylewów odpowiednio młyna prętowego i kulowego.

W schemacie uwzględniono tylko te transmitancje transportowe, które wnoszą czas opóźnienia porównywalny ze stałymi czasowymi poszczególnych procesów. W przypadkach kiedy materiał bezpośrednio wpływa z jednego urządzenia do drugiego, czas jego transportu (jako bardzo krótki) pominięto.

3. Symulacyjna analiza układu

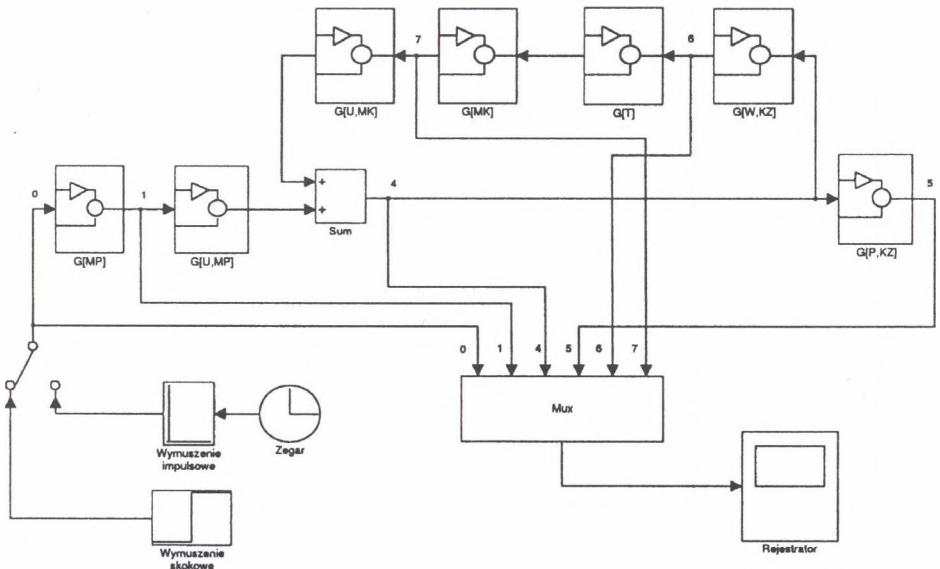
Korzystając z programu SIMULINK MATLAB [6] schemat blokowy układu z rysunku 2 przedstawiono za pomocą schematu do obliczeń. Schemat ten pokazano na rysunku 3.

Górna część rysunku przedstawia schemat blokowy układu z opisanymi poszczególnymi blokami. Każdy z tych bloków zaprogramowano w postaci odpowiedniego schematu blokowego rozdzielającego człon proporcjonalny, inercyjny i opóźniający transmitancji.



Rys.2. Schemat blokowy układu zamkniętego

Fig.2. Block diagram of closed system



Rys.3. Schemat blokowy do obliczeń

Fig.3. Block diagram for calculations

Dolna część rysunku 3 symbolicznie przedstawia zegar i przełącznik, które umożliwiają wprowadzenie do układu (punkt 0) odpowiedniej postaci wymuszenia: skokowego lub impulsowego oraz rejestrator, który umożliwia zarejestrowanie w postaci rysunku, przebiegu w poszczególnych punktach układu: 0, 1, 4 ÷ 7.

Do obliczeń przyjęto [9], określone drogą eksperymentu przemysłowego, następujące postacie liczbowe transmitancji poszczególnych bloków:

$$G_{MP} = \frac{K_1 e^{-s \tau_1}}{T_1 s + 1} = \frac{1,8 e^{-2s}}{10,6 s + 1}$$

$$G_{P,KZ} = \frac{K_2}{T_2 s + 1} = \frac{1,3}{4,5 s + 1}$$

$$G_{W,KZ} = \frac{K_3 e^{-s \tau_3}}{T_3 s + 1} = \frac{2,3 e^{-0,8s}}{4,5 s + 1}$$

$$G_T = e^{-s \tau_5} = e^{-0,5s} \quad (1)$$

$$G_{MK} = \frac{K_4 e^{-s \tau_4}}{T_4 s + 1} = \frac{0,27 e^{-1,2s}}{6,3 s + 1}$$

$$G_{U,MP} = K_6 = 0,2$$

$$G_{U,MK} = K_7 = 0,8$$

W transmitancjach tych stałe K oznaczają współczynniki wzmocnienia, T – stałe czasowe, a τ – czasy opóźnienia.

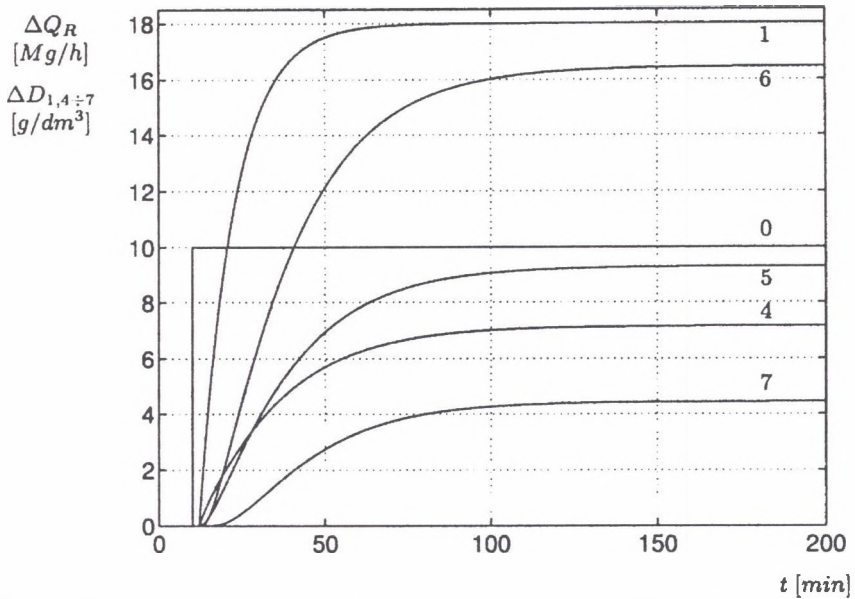
Przyjęte wartości $G_{U,MK}$ i $G_{U,MP}$ oznaczają, że zawrót materiału młyna kulowego do klasyfikatora w stosunku do nadawy z młyna prętowego wynosi 400%, co w warunkach zakładów przerobczych jest wartością dość typową.

Jako wymuszenie skokowe na wejściu do młyna prętowego przyjęto skok masowego natężenia przepływu rudy do młyna wynoszący 10 Mg/h. Oznacza to, że wymuszenie skokowe ma postać:

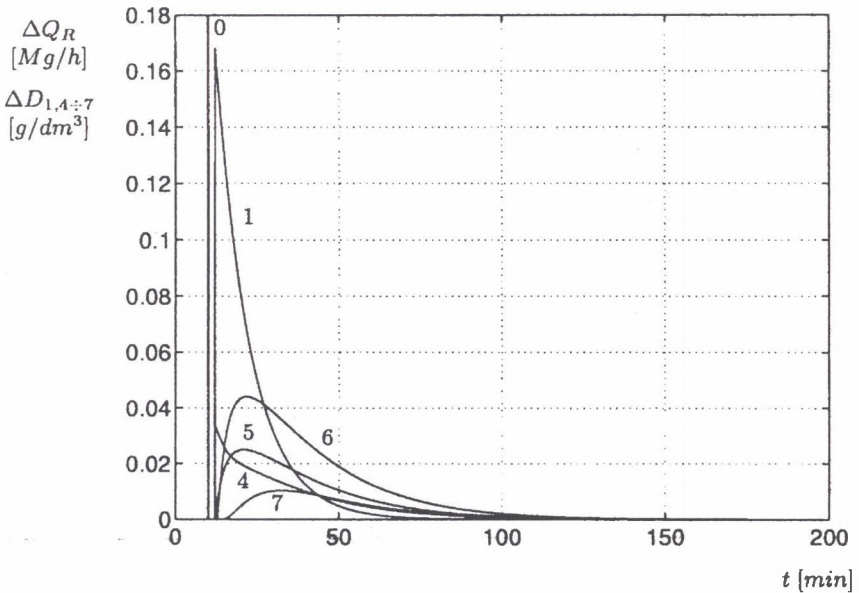
$$u(t) = 10 \cdot 1(t) \quad (2)$$

Taka wartość skoku wymuszenia (często wprowadzana w praktyce) pozwala na odczytanie realnych wartości zmian parametrów w poszczególnych punktach schematu.

Na rysunku 4 przedstawiono zbiorczo przebiegi odpowiedzi, w poszczególnych punktach układu, na wymuszenie $10 \cdot 1(t)$. Odpowiedziami tymi będą gęstości produktów w tych punktach, przy czym wartości wymuszenia, jak i odpowiedzi będą przyrostami tych wielkości od ich wartości początkowych. Wymuszenie – dla lepszego uwidocznienia – wprowadzono w chwili $t = 10$. Z rysunku można określić charakter odpowiedzi, odczytać zastępcze stałe czasowe dla poszczególnych przebiegów oraz opóźnienia czasowe wystąpienia reakcji. Z rysunku można określić charakter przebiegów. Odpowiedź w punktach 1 i 4 ma charakter przebiegu inercyjnego pierwszego rzędu (start przebiegu jest pionowy, krzywe charakteryzują się wypu-

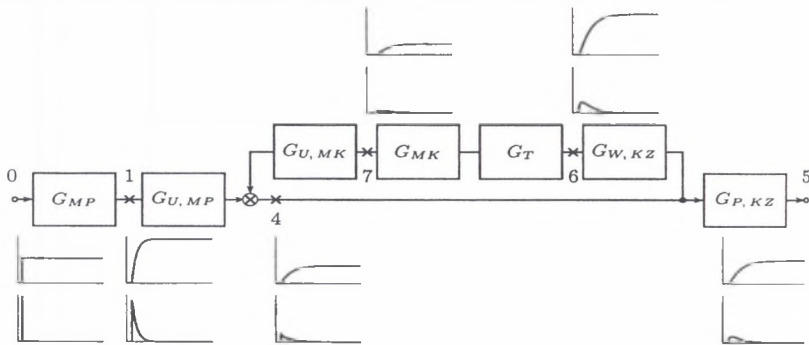


Rys 4. Zestawienie zbiorcze odpowiedzi układu na wymuszenie skokowe, gdzie: 0 – wymuszenie w punkcie 0 zaznaczonym na rys. 2 i 3; 1, 4÷7 – odpowiedzi odpowiednio w punktach 1, 4÷7 wg tych rysunków
 Fig. 4. Cumulative set of responses of the system for step compulsion function, where: 0 – function at point 0 marked in Fig. 2 and 3, 1, 4÷7 – responses at points, respectively, 1, 4÷7 in marked these Figures

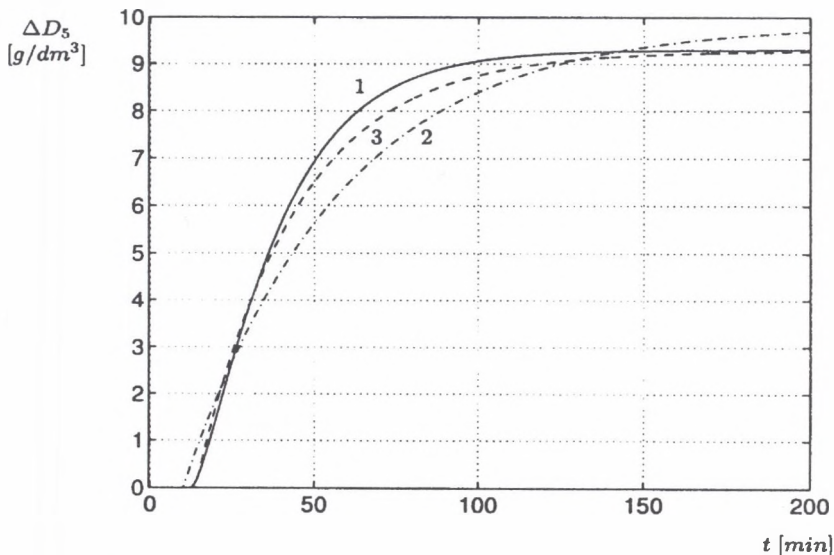


Rys.5. Zestawienie zbiorcze odpowiedzi układu na wymuszenie impulsowe
 Fig. 5. Cumulative set of responses of the system for impulse compulsion function

kłóścią ku górze i nie posiadają punktu przeięcia). Odpowiedzi w pozostałych punktach mają charakter przebiegów inercyjnych rzędów wyższych niż pierwszy (start poziomy, wypukłość w początkowym przebiegu ku dołowi, punkt przeięcia). Z rysunku 4 można określić też przybliżony czas ustabilizowania się procesu po wprowadzonej zmianie. Rysunek 5 przedstawia zbiorczo odpowiedzi w poszczególnych punktach na wymuszenie impulsowe $\delta(t)$. Na rysunku 6 poglądowo przedstawiono sposób przemieszczania się sygnału wymuszenia przez poszczególne elementy układu oraz kształt odpowiedzi tych elementów. Widać, jak skokowy sygnał ulega stopniowej zmianie poprzez przebieg pierwszego rzędu do przebiegów coraz wyższych rzędów w miarę oddalania się od czoła procesu, czyli od miejsca wprowadzenia wymuszenia. Impulsowy zaś sygnał ulega systematycznemu wygładzaniu i zanikowi.



Rys.6 Przemieszczanie się sygnału wymuszenia w układzie
 Fig.6. Relocation of compelled signal in the system



Rys.7. Odpowiedź układu w punkcie 5 wraz z jej aproksymacjami, gdzie: 1 – przebieg główny; 2 – aproksymacja uzyskana metodą najmniejszych kwadratów; 3 – aproksymacja metodą bezpośredniego odczytu
 Fig.7. System response at point 5 together with its approximations, where: 1 - main course, 2 - approximation obtained by least-square method, 3 - approximation obtained by direct reading method

Najistotniejszy, z technologicznego punktu widzenia, jest przebieg odpowiedzi w punkcie 5 opisujący przelew klasyfikatora, który to przelew jest produktem finalnym układu. Na rysunku 7 przedstawiono tę odpowiedź. Jak już wcześniej powiedziano, jest to przebieg wykładniczy rzędu wyższego niż pierwszy. Przebieg ten aproksymowano modelami wykładniczymi, trójparametrowymi pierwszego rzędu (parametry: współczynnik wzmocnienia, stała czasowa, opóźnienie czasowe). Na rysunku obok przebiegu głównego umieszczono dwie aproksymacje. Pierwszą uzyskaną metodą najmniejszych kwadratów przedstawia linia 2, drugą zaś uzyskaną metodą bezpośredniego odczytania parametrów aproksymacji z rysunków 4 i 7 przedstawia linia 3. Funkcja aproksymacyjna pierwsza ma analityczną postać:

$$F(t)_{apr.1} = 9,8646 \left(1 - e^{-\frac{t-0,43}{47,17}} \right) \quad (3)$$

natomiast druga:

$$F(t)_{apr.2} = 9,28 \left(1 - e^{-\frac{t-3,76}{30}} \right) \quad (4)$$

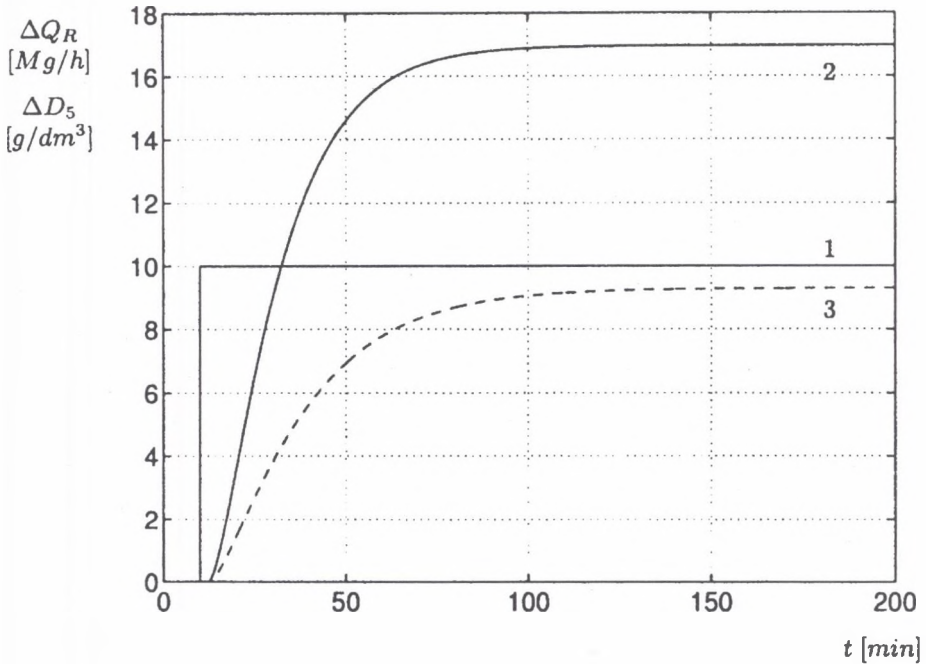
Jak widać, obydwie funkcje charakteryzują się znacznej wartości stałymi czasowymi – odpowiednio 47, 17 i 30 minut. Jeżeli nawet przyjąć stałą czasową równą 30 min (druga aproksymacja wydaje się dokładniejsza), to oznacza to, że proces po wprowadzeniu wymuszenia (zakłócenia) stabilizuje się bardzo powoli. Parametr wyjściowy (gęstość przelewu) osiąga 95% swojej nowej wartości ustalonej w czasie równym $3T$ oraz 98% wartości ustalonej w czasie $4T$. To znaczy, że w rozpatrywanym przypadku stabilizacja nastąpi, dla przyjętych stopni stabilizacji, odpowiednio po 90 minutach i 120 minutach. Tak długo też krążą w układzie niektóre grubsze klasy ziarnowe rudy.

Z powyższego wynika wniosek dotyczący sterowania procesem. Skuteczne sterowanie procesem mielenia i klasyfikacji w układzie zamkniętym za pomocą parametrów wejściowych młyna prętowego jest utrudnione z uwagi na występujący czas opóźnienia reakcji układu, ale głównie z uwagi na dużą jego inercję (duża wartość stałej czasowej T). W miarę możliwości sterowanie takie należy zastępować sterowaniem klasyfikatorem (np. wysokością progu przelewowego, ilością dodawanej wody). Wydaje się też celowe, przed przystąpieniem do wprowadzania systemów automatycznego sterowania tymi procesami, upraszczanie schematów technologicznych (o ile jest to technologicznie dopuszczalne) przez zastępowanie układów zamkniętych (z materiałowym sprzężeniem zwrotnym) układami otwartymi, np. w rozpatrywanym przypadku układem otwartym młyn – klasyfikator – młyn.

Istotnym czynnikiem mającym wpływ na jakość pracy zamkniętego układu młyn – klasyfikator – młyn jest wielkość zawrotu materiałowego. Na rysunku 8 przedstawiono odpowiedzi układu (punkt 5) na, jak dotychczas rozpatrywano, skokowe wymuszenie na wejściu młyna prętowego, dla zawrotu 400% (linia 3) oraz 100% (linia 2). Widać, że zmniejszenie ilości zawracanej rudy powoduje wzrost przyrostu gęstości przelewu klasyfikatora. Stała czasowa przebiegu, a więc i czas stabilizacji procesu nie ulegają zmianie.

Rozpatrywany układ przebadano także pod kątem wpływu zakłóceń lub wymuszeń oddziałujących w różnych miejscach wewnątrz układu. Takie zakłócenia mogą wpływać na układ m.in. w punktach 4, 6, 7, a więc oddziaływać na sumaryczną nadawę klasyfikatora, wylew klasyfikatora, czy wylew młyna kulowego. Mogą to być dodatkowe strumienie lub porcje wody lub mętów.

Wyników obliczeń nie zamieszczono. Podobne są one do wyników otrzymanych i przedstawionych powyżej dla układu z wymuszeniem w punkcie 0.



Rys.8. Odpowiedzi układu w punkcie 5 przy 400- i 100-procentowym zawrocie produktu młyna kulowego, gdzie: 1 – wymuszenie; 2 – odpowiedź dla zawrotu 100%; 3 – odpowiedź dla zawrotu 400%

Fig.8. System responses at point 5 for 400% and 100% turn backs of the product for ball mill, where: 1 - compulsion function, 2 - response for 100% turn back, 3 - response for 400% turn back

4. Zakończenie i wnioski

Zastosowana analiza dynamiki złożonych układów technologicznych przeróbki surowców mineralnych za pomocą komputerowej metody symulacyjnej wykorzystującej schematy blokowe oraz transmitancje operatorowe, obok wartości poznawczych dotyczących samej dynamiki (właściwości dynamiczne, sterowanie), stanowi także praktyczne narzędzie wyjaśniania wielu problemów technologicznych, takich jak: czas krążenia surowca w zawrotach, określenie optymalnej wielkości zawrotu, stabilizacja parametrów produktów wyjściowych, upraszczanie schematów.

Wielką zaletą symulacyjnych metod badania obiektów jest możliwość przebadania tych obiektów w zakresach często niemożliwych do przebadania w warunkach zakładów przerobczych czy laboratoriów.

Badania symulacyjne nie zakłócają rzeczywistego procesu, są tanie i nie są związane z drogimi eksperymentami przemysłowymi.

LITERATURA

1. Green J.C.A.: *The optimisation of flotation networks*. International Journal of Mineral Processing, 13 (1984). Amsterdam s. 83-103.
2. Inoue T., Ikaya K.: *Factors Affecting the Performance of the Fuzzy Control System for Mineral Processing – A Simulation Study*. XVIII IMPC, Sydney 1993.
3. Lynch A.J., Johanson N.W., Manlapig E.W., Thorne G.A.: *Mineral and Coal Flotation Circuits: Their Simulation and Control*. Elsevier, Amsterdam 1981.
4. Lynch A.J.: *Mineral crushing and grinding Circuits*. Their Simulation Optimisation, Design and Control Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York 1977.
5. Meloy T.P.: *Analysis and optimization of mineral processing and coal-cleaning circuits – circuit analysis*. International Journal of Mineral Processing, 10 (1983), Amsterdam s. 61-80.
6. Moler C., Little J., Bangert S.: *PC-Matlab for MS-DOS Personal Computers*. The Math Works, Inc. Sherborn 1987.
7. Niestierow G.S.: *Technologiczeskaja optimizacja obogatitielnych fabrik*. Niedra, Moskwa 1976.
8. Osiowski J.: *Zarys rachunku operatorowego*. WNT, Warszawa 1972.
9. Trybalski K.: *Analiza właściwości dynamicznych procesów i układów technologicznych przeróbki surowców mineralnych*. Rozprawy, monografie 83, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 1999.
10. Trybalski K.: *Określenie transmitancji modeli urządzeń przerobczych na podstawie ich przemysłowych charakterystyk czasowych*. Kompleksowe wykorzystanie surowców a ochrona środowiska. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 1998, s. 89-107.
11. Trybalski K.: *Transmitancyjne modelowanie dynamiki procesów przeróbki kopalin*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1399 „Górnictwo” z. 238, Gliwice 1998, s. 321-339.
12. Williams M.C., Meloy T.P.: *Dynamic model of flotation cell banks – circuit analysis*. International Journal of Mineral Processing 10 (1983), Amsterdam 1983, s. 141-160.

Artykuł opracowano w ramach pracy statutowej nr 11.11.100.238

Recenzent: Prof. dr hab. Stanisław Cierpisz

Abstract

Complexity and diversity of processes and technology schemes of processing of mineral materials pose problems in analysis and assessment of these processes. Lack of uniform description of phenomena, which take place in these processes, makes it necessary to search for variety methods in this scope.

The simulation software, which uses methods of block diagrams and transmittance models for analysis of dynamic properties of systems composed of several technological operations, was presented in this paper. The mill-classifier-mill closed system was studied using this method. The analysis was made for data obtained during industrial experiments which were carried out on copper ore enrichment plants.