

*Kazimierz Trybalski**, *Dariusz Foszcz**, *Andrzej Konieczny***

**ANALIZA PRACY
UKŁADU TECHNOLOGICZNEGO MIELENIA I FLOTACJI
Z WYKORZYSTANIEM MODELI
BLOKOWYCH, TRANSMITANCYJNYCH
ORAZ PROGRAMU SIMULINK MATLAB*****

1. Wstęp

Modelowanie jest wygodną, a niekiedy jedyną możliwą formą analizy procesów technologicznych. Modelowanie oznacza zestaw działań związanych z konstruowaniem modeli procesów rzeczywistych i polega na ich zastępowaniu układami uproszczonymi (modelami) odzwierciedlającymi wybrane cechy zjawisk zachodzących w tych procesach. Jako rzeczywiste obiekty modelowania rozpatrywane są: procesy przeróbki kopalin i ich technologiczne realizacje, maszyny i urządzenia, w których przebiegają, układy ich kontroli i sterowania, ale także surowce mineralne poddawane tym procesom. Potrzeba zastępowania procesów modelami wynika najczęściej ze zbyt obszernego, a tym samym nieczytelnego zasobu informacji o procesach technologicznych, procesy te cechują się ponadto dużą złożonością i różnorodnością. Złożoność procesów przerobczych wyraża się dużą liczbą i różnorodnością wielkości charakteryzujących przebiegi procesów, wewnętrznymi powiązaniem między tymi wielkościami i często nieliniowym charakterem tych powiązań. Procesy technologiczne występujące w zakładach przerobczych mają różnorodny charakter i przebiegają według różnych zasad fizycznych i fizykochemicznych, występują one ponadto w różnych konfiguracjach (schematach) w zależności od rodzaju przerabianego surowca. Procesy te przebiegają najczęściej w układach wielofazowych (różne stany skupienia surowca i ośrodka). Układy technologiczne zakładów przerobczych są skomplikowane, można w nich wyróżnić m.in. materiałowe sprzężenia zwrotne czy równoległe pracujące maszyny oraz całe ciągi technologiczne.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** KGHM Polska Miedź SA, Oddział Zakłady Wzbogacania Rud, Polkowice

*** Artykuł jest wynikiem realizacji pracy statutowej AGH nr 11.11.100.238

Modelowanie, w przypadku układu złożonego, jest jego zastępowaniem układem uproszczonym, który odzwierciedla wybrane cechy zjawisk zachodzących w tym procesie. Modelowanie stosuje się też w sytuacjach przeciwnych do opisanych powyżej, wtedy kiedy informacja o procesie, jego strukturze, charakterze i parametrach opisujących proces jest zbyt mała i niepełna. Wtedy także, przy zastosowaniu pewnych klas modeli i metod modelowania, można określić model procesu, odzwierciedlający — z wymaganą dokładnością — jego charakter i zachowanie.

2. Opis zastosowanej metody modelowania

Złożoność i różnorodność procesów i schematów technologicznych przeróbki rud miedzi jest przyczyną trudności ich analizy i oceny. Brak jednolitego opisu zjawisk zachodzących w poszczególnych procesach zmusza do poszukiwania metod uniwersalnych. Do metod takich zaliczyć można metody schematów blokowych oraz związanych z nimi często modeli transmitancyjnych. Schemat blokowy jest wygodnym sposobem graficznego przedstawienia zależności między elementami badanego układu (schematu). Blok oznacza pewną jednoznaczną zależność między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi. Nie musi on być oparty na modelu matematycznym rozpatrywanego układu, lecz jedynie na wzajemnym oddziaływaniu zmiennych. Jednocześnie zawsze z niego wynika sposób oddziaływania tych zmiennych. Bloki w schematach opisywane są często przy pomocy transmitancji.

Schemat blokowy jest uniwersalną metodą przedstawiania układów (schematów), gdyż jeden blok może reprezentować sobą cały układ bez względu na stopień jego złożoności. W odniesieniu do analizowanego schematu technologicznego wzbogacania rudy miedzi, jednym blokiem można zastąpić zarówno poszczególne maszyny, jak: młyn, klasyfikator, maszynę flotacyjną, ale też węzły technologiczne bądź całe ciągi technologiczne.

Posługiwanie się schematami blokowymi jest dogodne zwłaszcza w przypadkach, kiedy występują elementy połączone szeregowo, równolegle, czy też występują zawroty materiałowe — co ma miejsce w rozpatrywanym przypadku analizy schematu wzbogacania rudy miedzi. Znajomość modeli (transmitancji) poszczególnych elementów (bloków) oraz znajomość zasad łączenia bloków daje możliwość określenia właściwości całego układu. Schematy blokowe pozwalają także na prześledzenie przepływu sygnałów przez cały układ oraz przez poszczególne elementy.

Transmitancja jest przyczynowo-skutkowym modelem określającym, w jakim stosunku zmienny sygnał wejściowy jest przekształcany na zmienny sygnał wyjściowy. Transmitancja operatorowa jest podstawowym modelem wykorzystywanym w analizie dynamiki złożonych układów liniowych. Wielkość ta charakteryzuje układ dynamiczny liniowy przy zerowych warunkach początkowych z punktu widzenia relacji między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi, nie wchodząc w szczegóły związane ze strukturą i stanem wewnętrznym układu.

Definicja transmitancji operatorowej jest następująca: transmitancją operatorową $G(s)$ układu liniowego stacjonarnego nazywamy wyrażenie określone jako stosunek $Y(s)$ — trans-

formaty Laplace'a odpowiedzi $y(t)$, do $U(s)$ — transformaty Laplace'a wymuszenia $u(t)$ przy zerowych warunkach początkowych

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (1)$$

gdzie:

$$Y(s) = \int_0^{\infty} y(t)e^{-st} dt \quad \text{— transformata odpowiedzi,}$$

$$U(s) = \int_0^{\infty} u(t)e^{-st} dt \quad \text{— transformata wymuszenia,}$$

s — zmienna zespolona Laplace'a.

Transmitancja jest wielkością zespoloną zależną tylko od parametrów układu. Transmitancji operatorowej $G(s)$ odpowiada w dziedzinie czasu funkcja przejścia $g(t)$. Znajomość postaci wyrażenia matematycznego określającego transmitancję pozwala na określenie struktury analizowanego systemu. Jak już wspomniano, transmitancje najczęściej występują w powiązaniu ze schematami blokowymi.

3. Modelowanie schematu

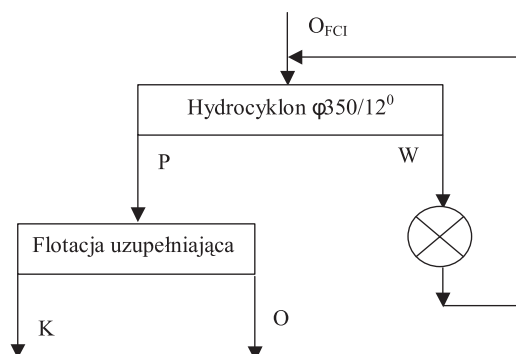
Punktem wyjścia do modelowania schematu wzbogacania były wyniki badań laboratoryjnych procesów mielenia i flotacji. Proces flotacyjnego wzbogacania rud miedzi jest ściśle związany z procesem mielenia, rozumianym nie jako proces pomniejszania wielkości ziaren, a jako proces uwalniania ziarn minerałów użytecznych. Z uwagi na fakt, iż siarczki miedzi są minerałami łatwo flotowanymi, o wyflotowaniu ziarn kruszczowych decyduje w głównej mierze ich stopień uwolnienia od skały płonnej oraz ich wielkość. W celu określenia wpływu procesu mielenia na skład granulometryczny oraz wzbogalność rudy miedzi przeprowadzono badania skuteczności procesu mielenia oraz wzbogalność produktów mielenia.

Uzyskane wyniki badań umożliwiły określenie zależności funkcyjnych przyrostu klasy ziarnowej w funkcji czasu mielenia oraz wyników flotacyjnego wzbogacania w funkcji udziału poszczególnych klas ziarnowych w nadawie na flotację [4].

3.1. Schemat technologiczny

Modelowanym obiektem jest część schematu technologicznego zaproponowana na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, a obejmująca klasyfikację w hydrocyklonach, domielanie i flotację uzupełniającą odpadów pierwszego czyszczenia koncentratu zawierających trudnowzbogalalne frakcje rudy miedzi.

Analizowaną część schematu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Analizowana część schematu technologicznego wzbogacania rud miedzi [4]

Schemat ten obok operacji mielenia i flotacji zrealizowanych w warunkach laboratoryjnych na rzeczywistych próbkach produktu przemysłowego (odpady z flotacji czyszczącej I) zawiera także klasyfikację w hydrocyklonach, której nie prowadzono w warunkach laboratoryjnych, a która jest operacją niezbędną dla wydzielenia z połączonych produktów badanego odpadu z flotacji czyszczącej i domielonego wylewu klasyfikacji produktu (przelewu) dostatecznie zmielonego w celu skierowania go do flotacji uzupełniającej.

3.2. Modelowanie transmitancyjne

Przypisując poszczególnym operacjom technologicznym bloki i transmitancje $G(s)$ analizowany schemat technologiczny można przedstawić przy pomocy schematu blokowego przedstawionego na rysunku 2.

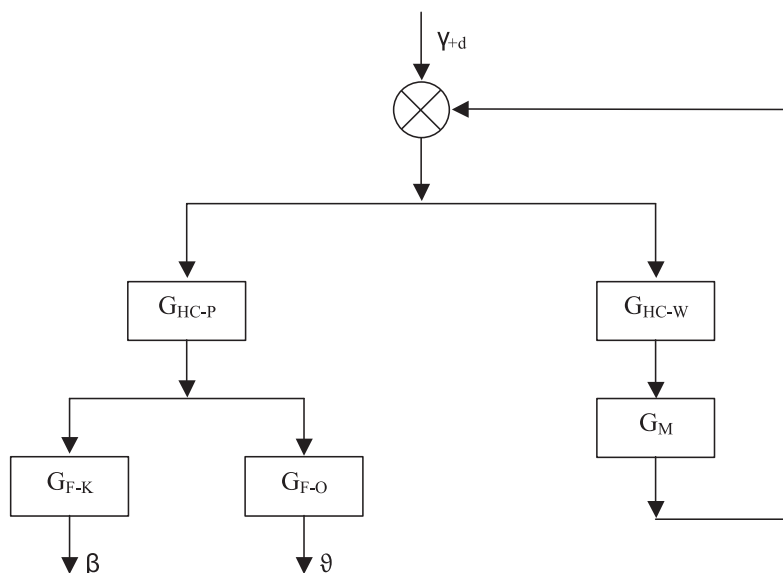
Na rysunku 2 bloki (prostokąty) oznaczają operacje bądź ich umownie wydzieloną część (kanał przepływu informacji), linie skierowane — przepływ sygnałów (wielkości ilościowych lub jakościowych charakteryzujących proces) i powiązania między blokami.

Występującym w schemacie technologicznym różnym operacjom (klasyfikacja, mielenie, flotacja) odpowiadają różne typy i postacie modeli transmitancyjnych, które dla uproszczenia, w tej części analizy, oznaczono ogólnymi symbolami G z odpowiednimi indeksami:

- G_{HC-P} — transmitancja „kanału” przelewowego hydrocyklonu,
- G_{HC-W} — transmitancja „kanału” wylewowego hydrocyklonu,
- G_M — transmitancja młyna,
- G_{F-K} — transmitancja „kanału” koncentratowego flotacji,
- G_{F-O} — transmitancja „kanału” odpadowego flotacji.

Schematy, zarówno technologiczny, jak i blokowy, ujmują tylko operacje technologiczne przerobcze, pomijają zaś urządzenia pomocnicze, jak rząpia, rurociągi, pompy itp.

Pełna analiza schematu technologicznego, zwłaszcza z punktu widzenia jego dynamiki, wymaga uwzględnienia tych urządzeń.



Rys. 2. Analizowany schemat technologiczny przedstawiony przy pomocy schematu blokowego [4]

Redukując ten schemat blokowy i zwijając go można określić transmitancję zastępczą dla tego układu [11, 12]. I tak dla kanału przepływu sygnału: skład ziarnowy nadawy (odpady z I czyszczenia) — zawartość miedzi w koncentracie z flotacji uzupełniającej, transmitancja zastępcza będzie miała postać

$$G_{zast1}(s) = \frac{\beta(s)}{\gamma_{+d}(s)} = \frac{G_{HC-P}(s) \cdot G_{F-K}(s)}{1 - G_{HC-W}(s) \cdot G_M(s)} \quad (2)$$

Natomiast dla kanału przepływu sygnału: skład ziarnowy nadawy — zawartość miedzi w odpadach z flotacji uzupełniającej

$$G_{zast2}(s) = \frac{\vartheta(s)}{\gamma_{+d}(s)} = \frac{G_{HC-P}(s) \cdot G_{F-O}(s)}{1 - G_{HC-W}(s) \cdot G_M(s)} \quad (3)$$

Z powyższych zależności można określić przebieg zmian wielkości wyjściowych (β , ϑ) będący efektem wprowadzonych zmian na wejściu do układu (γ_{+d}); w postaci operatorowej oznaczają to odpowiednio zależności:

$$\beta(s) = \gamma_{+d}(s) \cdot G_{zast1}(s) \quad (4)$$

$$\vartheta(s) = \gamma_{+d}(s) \cdot G_{zast2}(s)$$

Postacie czasowe β i ϑ można uzyskać przez zastosowanie odwrotnego przekształcenia Laplace'a (L^{-1}), co można zapisać [5]:

$$\begin{aligned}\beta(t) &= L^{-1}[\beta(s)] = L^{-1}[\gamma_{+d}(s) \cdot G_{zast1}(s)] \\ \vartheta(t) &= L^{-1}[\vartheta(s)] = L^{-1}[\gamma_{+d}(s) \cdot G_{zast2}(s)]\end{aligned}\tag{5}$$

W celu znalezienia wartości czasowych β i ϑ równań (5) należy wstawić odpowiednie zależności dla $G_{zast1}(s)$ i $G_{zast2}(s)$ według (2) i (3), a następnie podstawić postacie transmittancji poszczególnych operacji technologicznych.

Na podstawie otrzymanych zależności przedstawiających przebiegi w czasie zmian zawartości miedzi w koncentracie z flotacji uzupełniającej (β) i zawartość miedzi w odpadach (ϑ) można określić przyrosty tych parametrów będące wynikiem skokowej zmiany składu ziarnowego nadawy do analizowanego układu (dla procesu ustalonego), ale także można określić charakter zmian tych przyrostów, ich szybkość narastania, opóźnienia po jakich wystąpią (parametry procesu przejściowego).

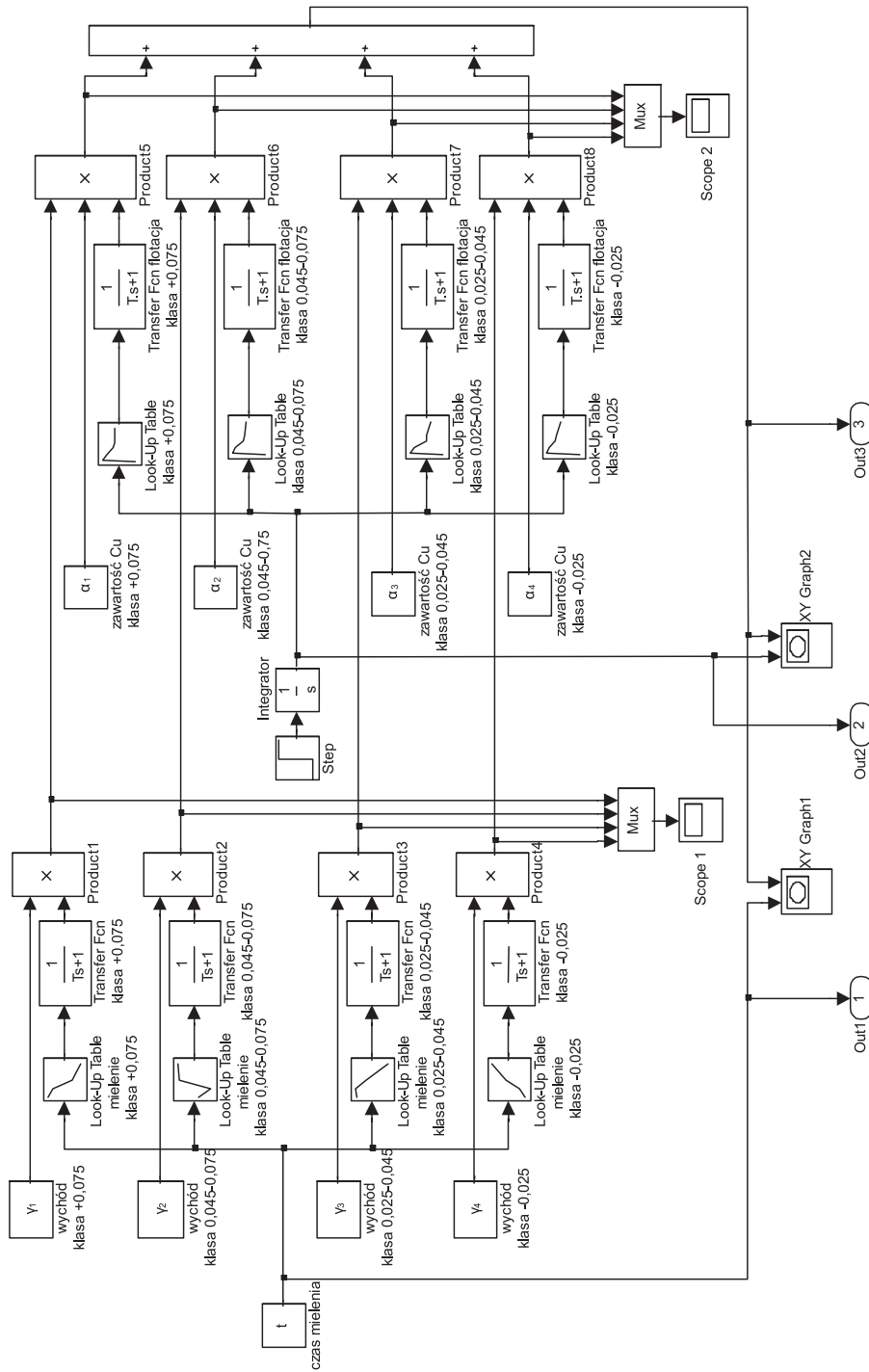
Przedstawione powyżej analityczne poszukiwanie odpowiedzi układu na wprowadzone na jego wejściu zmiany parametrów nadawy (w rozpatrywanym przypadku zmiany składu ziarnowego) jest możliwe do zrealizowania, choć uciążliwe i nie dające możliwości przebadania układu w szerokim zakresie zmian. Przedstawiona metoda analityczna jest podstawą zastosowanej w dalszej części pracy metody symulacyjnej analizy schematów.

4. Symulacyjne badanie schematu

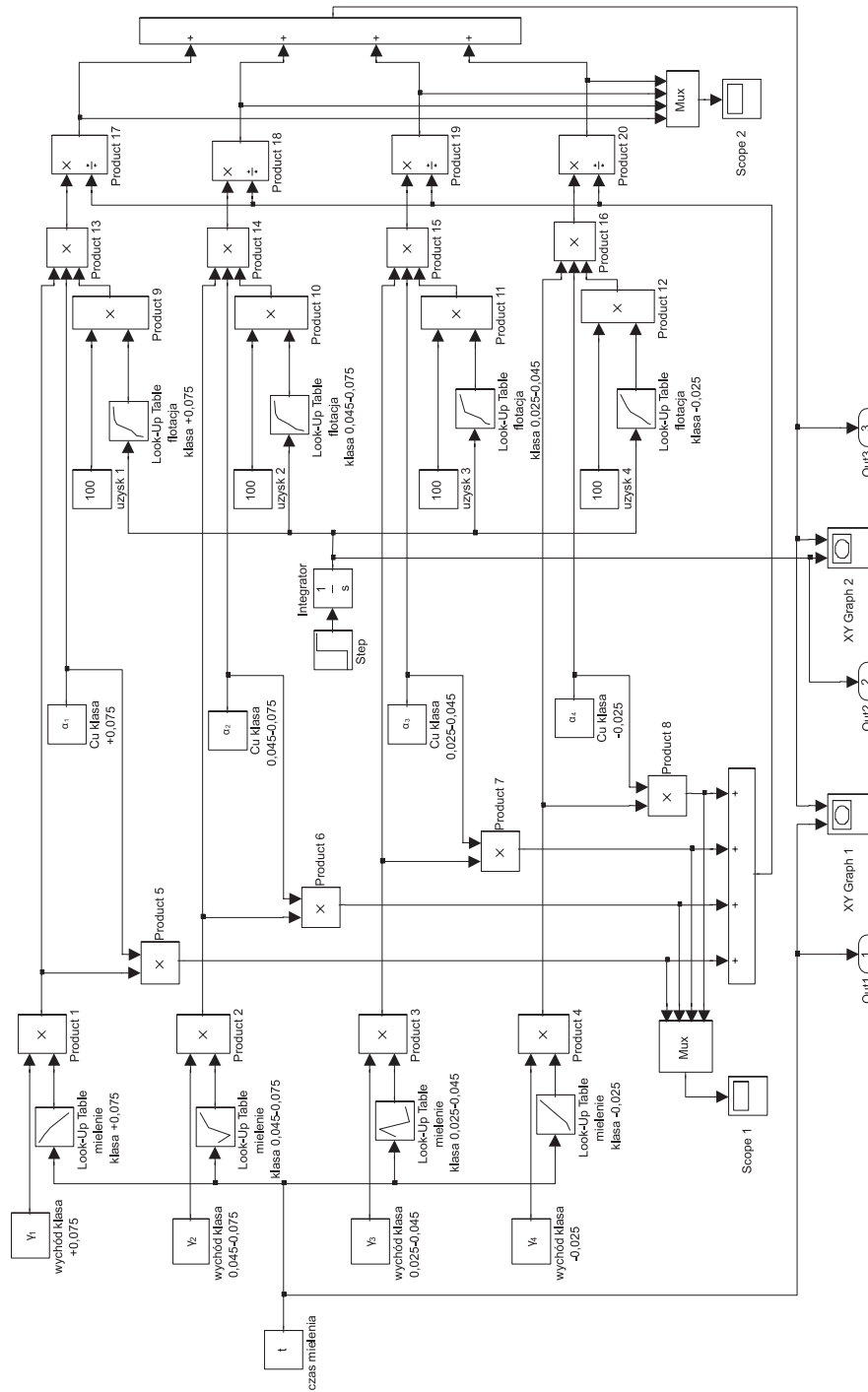
Poniżej przedstawiono symulacyjną analizę schematu. Analiza ta oparta jest na rzeczywistych wynikach przeprowadzonych badań laboratoryjnych. Wyniki te posłużyły do określenia parametrów poszczególnych bloków schematu do obliczeń. Symulacyjne metody badania schematów umożliwiają ich przebadanie w szerokim zakresie zmian parametrów poszczególnych operacji. Jest to metoda tania oraz, co oczywiste, nieinwazyjna. Przebadanie rozpatrywanego schematu w warunkach laboratoryjnych nie zawsze jest możliwe do zrealizowania w pełnym zakresie możliwych zmian parametrów, natomiast realizacja w warunkach przemysłowych wymagałaby prac inwestycyjnych, co teoretycznie mogłoby się okazać nieuzasadnione. Ponadto metody symulacyjne dają możliwości przebadania rozwiązań wariantowych. Korzyści z zastosowania metod symulacyjnych są więc ewidentne.

Do analizy symulacyjnej wykorzystano program Simulink Matlab. Program ten oparty jest na omawianych wcześniej schematach blokowych i modelach transmitancyjnych [1–3, 9].

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono struktury zaprogramowanych schematów do obliczeń. Rysunek 3 przedstawia schemat pozwalający na określenie i obserwację wartości oraz przebiegów zawartości miedzi w koncentracie z flotacji, natomiast rysunek 4 przedstawia schemat dla obliczeń uzysku miedzi w koncentracie z tej flotacji.



Rys. 3. Schemat blokowy modelu dla zawartości miedzi w koncentracji [4]



Rys. 4. Schemat blokowy modelu dla uzysku miedzi w koncentracji [4]

Schematy te obejmują główne operacje technologiczne: mielenie i flotację przedstawione w postaci odpowiednich bloków, a także bloki działań matematycznych i bloki wyjściowe. Każdemu blokowi, zgodnie z zasadą działania program Simulink, odpowiada transmitancja o ogólnej postaci

$$G(s) = e^{-st_0} \frac{K}{Ts + 1} \quad (6)$$

gdzie:

- K — współczynnik wzmocnienia,
- T — stała czasowa,
- t_0 — opóźnienie czasowe,
- s — zmienna Laplace'a.

Cała analiza przeprowadzona została dla klas ziarnowych zgodnie z wykonanymi w tych klasach badaniami laboratoryjnymi. Obydwa schematy do obliczeń w początkowej części obejmującej mielenie zawierają takie same elementy (bloki).

Poszczególne bloki w głównych torach schematów poczynając od lewej strony rysunków, oznaczają:

- blok „czas mielenia” — umożliwia zadanie czasu mielenia zgodnego z czasami mielenia w warunkach laboratoryjnych, a więc 5, 10, 20 minut;
- bloki „wychód klasa...” (4 bloki) oznaczają wychody poszczególnych klas ziarnowych (w których przeprowadzano analizę składu ziarnowego) w nadawie do badań, a więc w odpadach z flotacji I czyszczenia koncentratu. Wychody w postaci ułamkowej sumują się do 1. Ich wartości określono w badaniach laboratoryjnych;
- bloki „Look-Up Table mielenie klasa...” (4 bloki) zawierają współczynniki wzmocnienia transmitancji mielenia, które ujmują stosunek wielkości wyjściowej — zawartości (wychodu) badanej klasy w produkcji mielenia, do wielkości wejściowej — zawartości tej samej klasy w nadawie. Bloki te zawierają (niewidoczne na rysunku) wartości liczbowe wzmocnień dla każdego przebadanego czasu mielenia uzyskane na podstawie badań laboratoryjnych procesu mielenia;
- bloki „Transfer Fen klasa...” zawierają transmitancje mielenia, w których można zadać stałe czasowe (T) procesu. Wartość stałych związana jest z czasem mielenia, przyjęto że czas mielenia równa się czterem stałym czasowym ($4T$);
- bloki „Produkt 1...4” (4) przedstawiają realizację mnożenia sygnałów i umożliwiają otrzymanie wartości liczbowej wychodu badanej klasy ziarnowej w produkcji mielenia.

W schemacie dla obliczeń zawartości w jego dalszej części dotyczącej flotacji występują:

- blok „step” daje możliwości zadania wielkości wymuszenia w postaci skoku jednostkowego dla operacji flotacji;
- blok „Integrator” zawiera transmitancję równą $1/s$, jest to element całkujący realizujący kolejne wartości czasu flotacji;

- bloki „Cu klasa...” (4) przedstawiają zawartości miedzi w analizowanych klasach ziarnowych nadawy na flotację (α), wartości te określono w badaniach laboratoryjnych;
- bloki „Look-Up Table klasa...” (4) zawierają współczynniki wzmocnienia transmitancji operacji flotacji dla poszczególnych klas ziarnowych. Wartości liczbowe współczynników określono na podstawie wyników badań laboratoryjnych;
- bloki „Transfer Fen flotacja klasa...” zawierają transmitancje procesu flotacji umożliwiające wprowadzenie stałych czasowych przebiegu flotacji. Przyjęto, że czas flotacji równy jest 4 stałym czasowym;
- bloki „Produkt 5...8” (4) przedstawiają realizację podwójnego mnożenia sygnałów i umożliwiają otrzymanie wartości liczbowej zawartości miedzi w koncentracji z flotacji w danej klasie ziarnowej oraz wartości liczbowej zawartości miedzi w tej klasie z uwzględnieniem wartości wychodu klasy w nadawie;
- blok „+...+” — realizuje sumowanie zawartości miedzi we wszystkich klasach z uwzględnieniem, jak podano powyżej, wychodów tych klas.

Natomiast w schemacie do obliczeń uzysku w części dotyczącej mielenia nie ujęto bloków transmitancji, a w jego części dotyczącej flotacji obok bloków takich samych jak na poprzednim schemacie, a więc: „step”, „Integrator”, „Cu klasa” występują także nowe bloki:

- bloki „Produkt...”, które oznaczają operacje mnożenia zawartości miedzi w klasie przez wychód tej klasy ziarnowej, co jest niezbędne dla określenia uzysku miedzi w klasie, a wartość ta oznacza ilość miedzi w nadawie (w klasie);
- bloki „uzysk...” które oznaczają maksymalny uzysk (100) i pozwalają na określenie uzysku rzeczywistego na wyjściu z bloków „Produkt...” przy uwzględnieniu stopnia wzbogacenia uzyskanego w badaniach laboratoryjnych i przemysłowych;
- bloki „Look-Up Table klasa...” to bloki funkcyjne typu „wejście — wyjście” określające stopień wzbogacenia, w których zawarte są informacje dotyczące uzysków miedzi dla klas ziarnowych otrzymanych w przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych;
- bloki „Produkt...” pozwalają na określenie wartości liczbowej uzysku dla badań laboratoryjnych;
- bloki „Produkt...” pozwalają na określenie rzeczywistego uzysku przy danej zawartości miedzi w klasie i wychodzie tej klasy;
- bloki „x÷” pozwalają na określenie udziałów uzysku w klasach w stosunku do całości uzysku;
- bloki „+...+” realizują sumowanie ilości miedzi w klasach (w dolnej części rysunku) oraz sumowanie uzysków w klasach (w końcowej części rysunku).

W dolnej części rysunków 3 i 4 znajdują się symbole urządzeń wyjściowych umożliwiających obserwację poszczególnych wielkości (końcowych bądź pośrednich). Bloki „skope” i „skope 1” umożliwiają obserwację odpowiednio: wychodu klasy ziarnowej w produkcji mielenia, zawartość miedzi w koncentracji flotacji danej klasy lub uzysku miedzi w klasie.

Bloki „Mux” oznaczają multipleksowanie obserwowanych wielkości.

Bloki „XY Graph 1” oraz „XY Graph 2” umożliwiają obserwację jednego parametru w funkcji innego.

Bloki „Out...” umożliwiają wyprowadzenie danych dotyczących obserwowanych parametrów w postaci macierzowej.

Przedstawione i opisane schematy (rys. 3 i 4) do obliczeń zaprogramowane w programie Simulink Matlab posłużyły do przeprowadzenia badań symulacyjnych rozpatrywanego schematu technologicznego. Jak już powiedziano, parametry ilościowe schematów do obliczeń i ich poszczególnych bloków określono na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i przemysłowych wzbogacalności rudy miedzi. Poniżej przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, zakładających szerszą zmianę parametrów nadawy i parametrów zastosowanych operacji technologicznych.

Przebadano trzy możliwe i prawdopodobne warianty sytuacji zachowania się procesu przemysłowego w zakresie zmian zawartości wybranej klasy ziarnowej i zawartości miedzi w klasach:

- 1) Wzrasta wychód klasy najdrobniejszej w nadawie do rozpatrywanego węzła oraz jednocześnie wzrasta zawartość miedzi w tej klasie, co może być efektem pogorszenia flotacji I czyszczenia koncentratu, a co skutkuje przejściem większej ilości miedzi do najdrobniejszej klasy ziarnowej odpadów z tej flotacji. Założenia ilościowe:
 - wzrost wychodu klasy – 0,025 o ok. 25% (do 65%) przy równomiernie zmniejszających się wychodach pozostałych klas,
 - wzrost zawartości Cu w klasie – 0,025 o 4% (do 9,52%) przy nie zmieniających się zawartościach Cu w pozostałych klasach i w związku z tym odpowiednim wzrostem zawartości Cu w całej nadawie.
- 2) Wzrasta wychód klasy najgrubszej w nadawie bez zmian zawartości Cu w poszczególnych klasach, co może być skutkiem pogorszenia mielenia rudy przed flotacją czyszczącą I. Założenia ilościowe:
 - wzrost wychodu klasy + 0,075 o ok. 10% (do ok. 35%) przy równomiernie zmniejszających się wychodach pozostałych klas.
- 3) Wzrastają wychody klas grubych w nadawie oraz wzrastają jednocześnie zawartości miedzi w tych klasach, co może być efektem niedomielenia nadawy do flotacji czyszczącej I i w związku z tym niedostatecznym uwolnieniem minerałów miedzionośnych, które w konsekwencji nie wyflotowały i przeszły do odpadów tej flotacji. Założenia ilościowe:
 - wzrost wychodu klasy + 0,075 o ok. 5% (do ok. 30%),
 - wzrost wychodu klasy 0,045–0,075 o ok. 5% (do ok. 15%) przy równomiernie zmniejszających się wychodach pozostałych klas,
 - wzrost zawartości Cu w klasie + 0,075 o 2% (do 11,86%),
 - wzrost zawartości Cu w klasie 0,045–0,075 o 2% (do 10,26%) przy obniżeniu się zawartości miedzi w pozostałych klasach,

- maleje zawartość Cu w klasie 0,025–0,045 o 2% (do 5,51%),
- maleje zawartość Cu w klasie – 0,025 o 0,5% (do 5,02%).

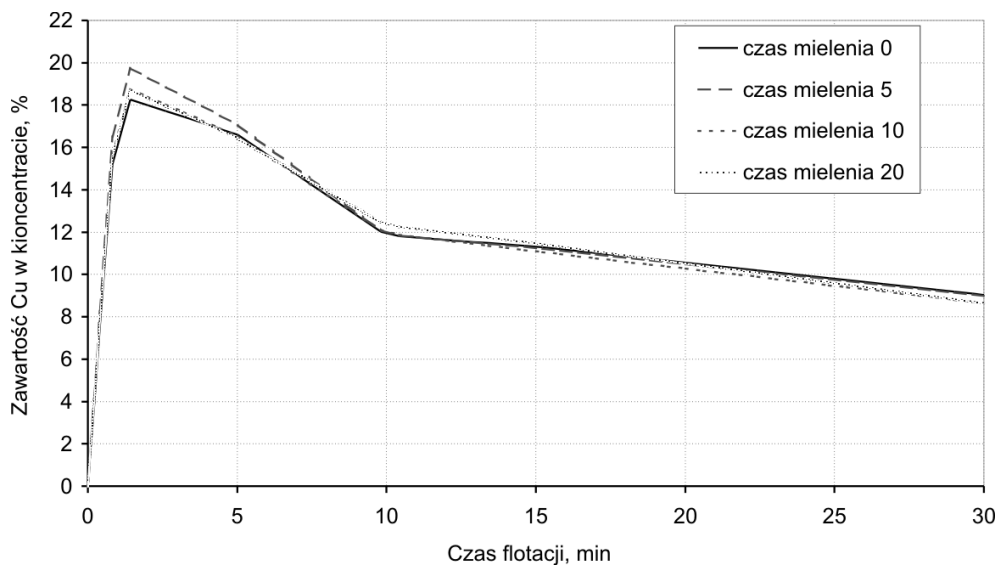
Parametry nadawy w poszczególnych wariantach oraz w bazowych badaniach laboratoryjnych przedstawia tabela 1.

TABELA 1

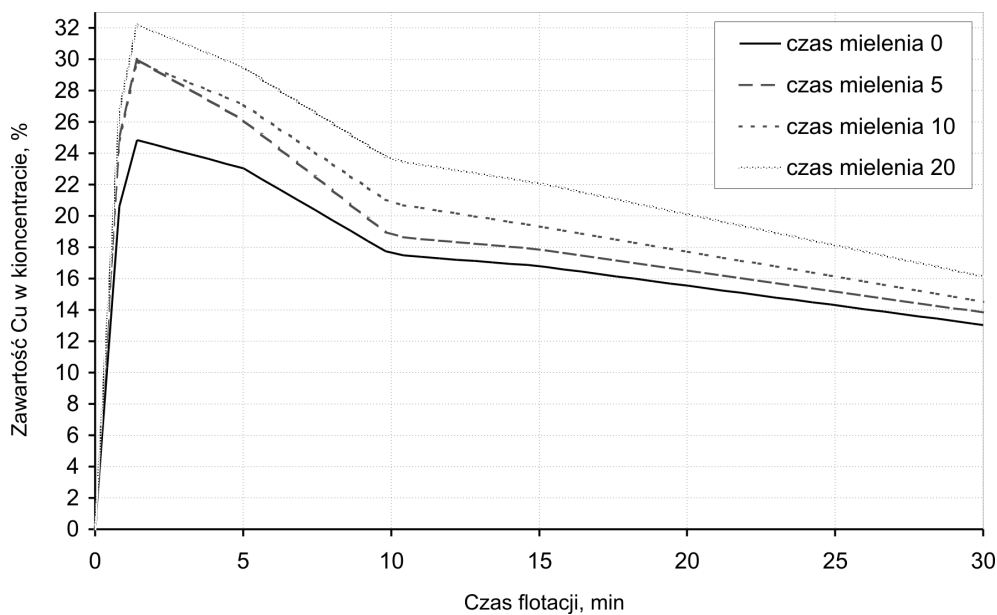
Parametry nadawy, tj. wychód poszczególnych klas ziarnowych i zawartość w nich Cu dla wyników badań laboratoryjnych (baza) oraz w poszczególnych wariantach [4]

Warianty modelowania	Klasa ziarnowa mm	Wychód klasy ziarnowej	Cu %
baza	+0,075	0,2542	9,86
	0,045÷0,075	0,1045	8,26
	0,025÷0,045	0,2394	7,51
	–0,025	0,4019	5,52
wariant 1	+0,075	0,1488	9,86
	0,045÷0,075	0,0612	8,26
	0,025÷0,045	0,1401	7,51
	–0,025	0,65	9,52
wariant 2	+0,075	0,3508	9,86
	0,045÷0,075	0,0910	8,26
	0,025÷0,045	0,2084	7,51
	–0,025	0,3498	5,52
wariant 3	+0,075	0,3000	11,86
	0,045÷0,075	0,1505	10,26
	0,025÷0,045	0,2052	5,51
	–0,025	0,3444	5,02

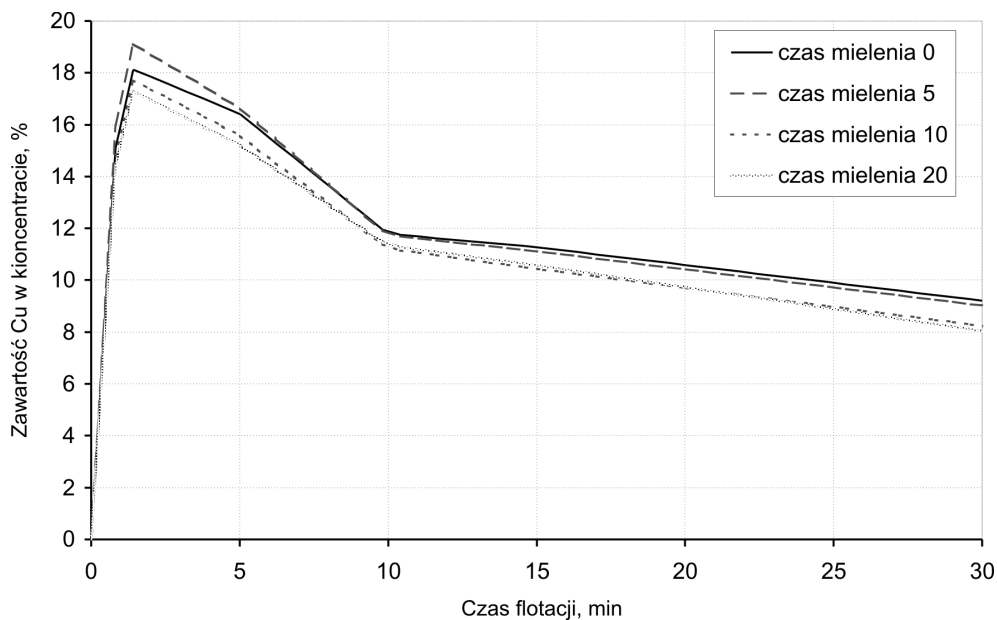
Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach, rysunki 5–8 przedstawiają — dla trzech wymienionych wariantów — zależności zawartości miedzi w koncentracie z flotacji uzupełniającej od czasu tej flotacji i czasu mielenia nadawy do niej (czasom mielenia odpowiadają poszczególne krzywe na danym rysunku), przy czym rysunek 5 przedstawia symulację wyników badań laboratoryjnych (baza). Rysunki 9–12 przedstawiają w takim samym ujęciu i dla tych samych wariantów zmiany wartości uzysku miedzi w koncentracie.



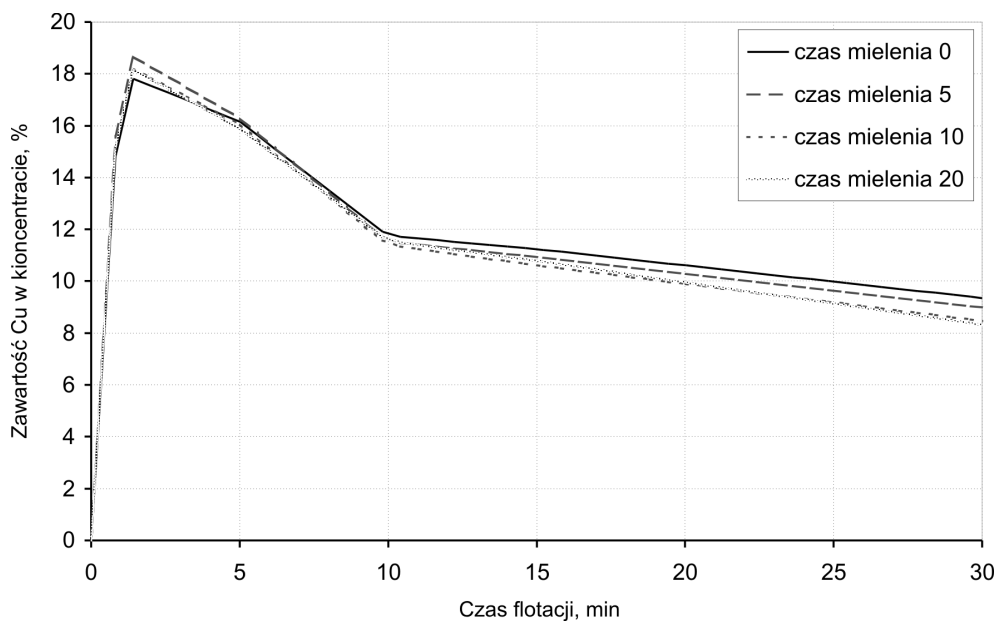
Rys. 5. Wpływ czasu flotacji na zawartość miedzi w koncentracie w zależności od czasu mielenia dla danych bazowych



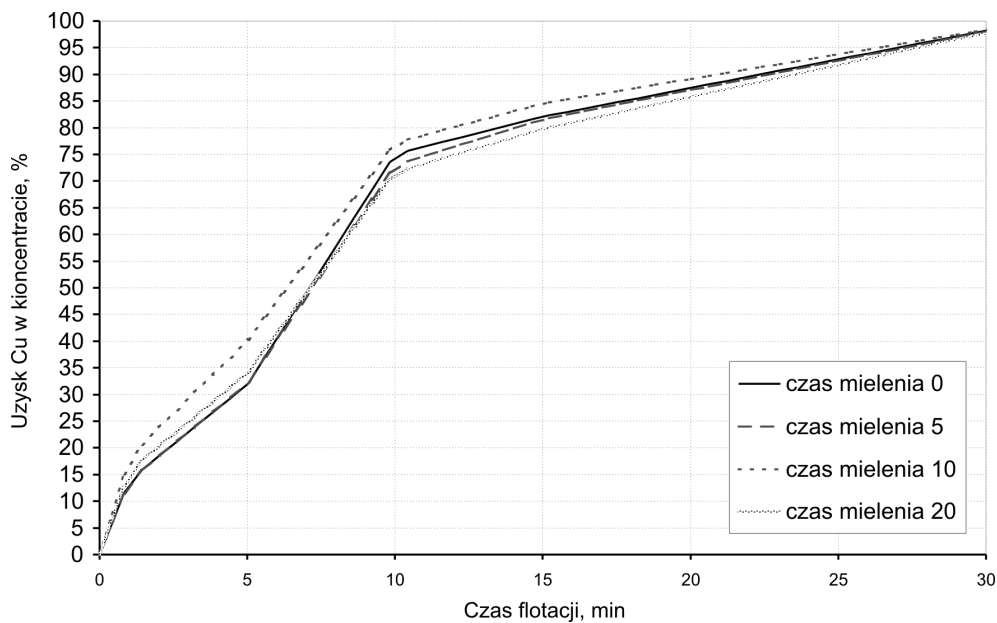
Rys. 6. Wpływ czasu flotacji na zawartość miedzi w koncentracie w zależności od czasu mielenia dla danych wariantu 1



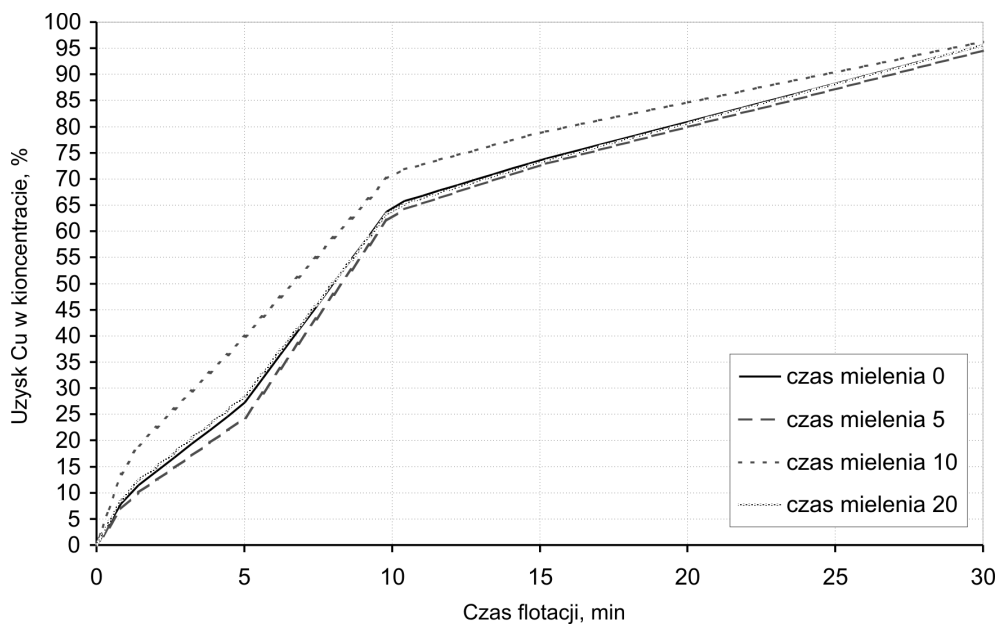
Rys. 7. Wpływ czasu flotacji na zawartość miedzi w koncentracie w zależności od czasu mielenia dla danych wariantu 2



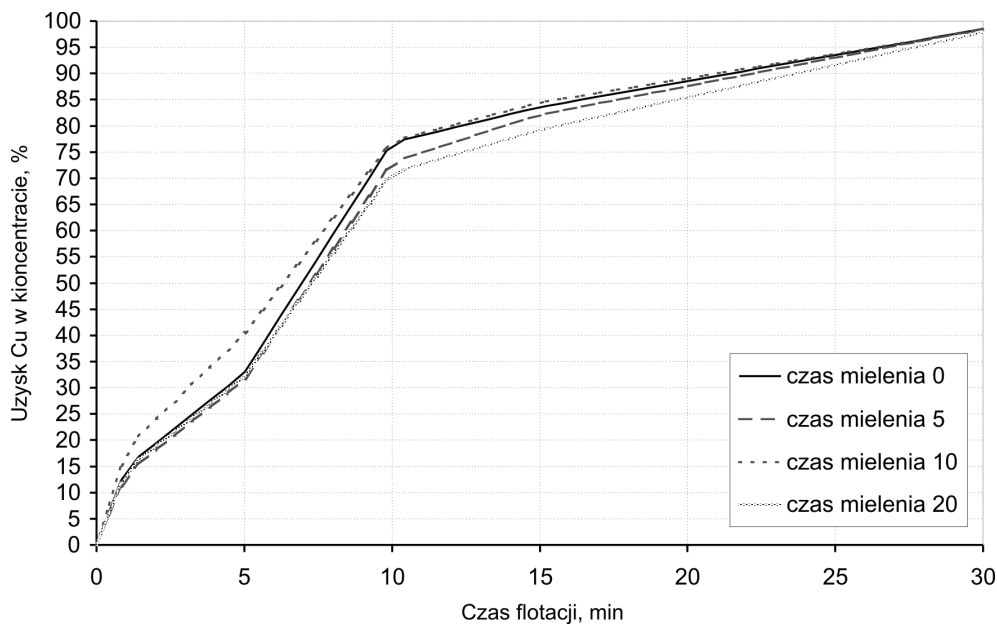
Rys. 8. Wpływ czasu flotacji na zawartość miedzi w koncentracie w zależności od czasu mielenia dla danych wariantu 3



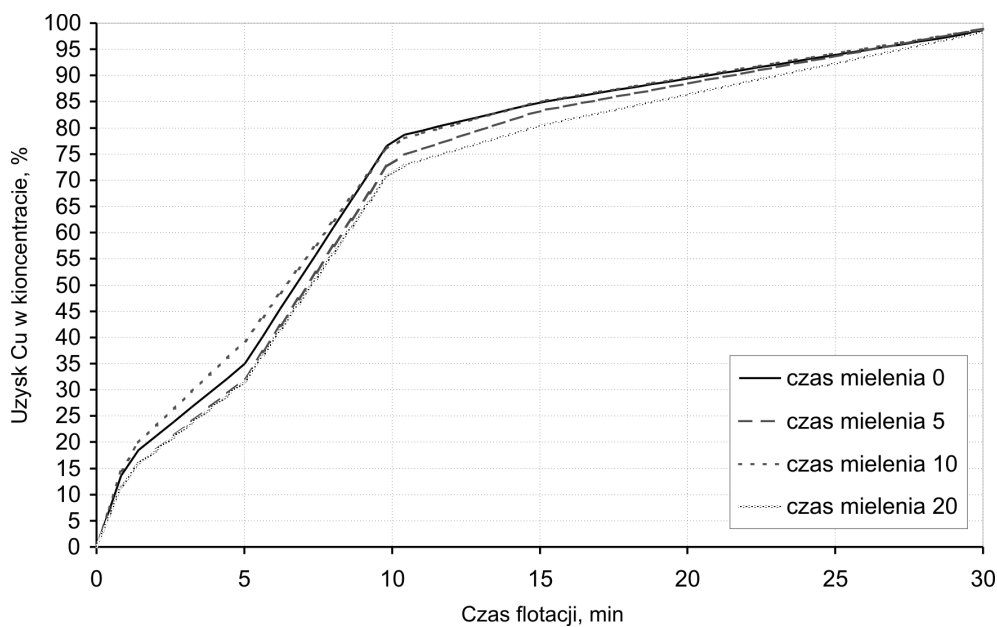
Rys. 9. Wpływ czasu flotacji na uzysk miedzi w koncentracie w zależności od czasu mielenia dla danych bazowych



Rys. 10. Wpływ czasu flotacji na uzysk miedzi w koncentracie w zależności od czasu mielenia dla danych wariantu 1



Rys. 11. Wpływ czasu flotacji na uzysk miedzi w koncentracji w zależności od czasu mielenia dla danych wariantu 2



Rys. 12. Wpływ czasu flotacji na uzysk miedzi w koncentracji w zależności od czasu mielenia dla danych wariantu 3

Wyniki badań laboratoryjnych przedstawiają krzywe na rysunku 5 — dla zawartości miedzi w koncentracji oraz na rysunku 9 — dla uzysku. Z wykresów dla zawartości miedzi w koncentracji widać, że mielenie wpływa na jakość koncentratu w całym praktycznie zakresie czasów flotacji. Najbardziej efektywne jest krótkie mielenie nadawy — czas mielenia 5 minut, które już przy zastosowaniu krótkich czasów flotacji (1, 5 minut) przynosi zdecydowane podwyższenie zawartości miedzi w koncentracji. Dłuższe mielenie (20 minut) daje efekty we flotacji dopiero dla dłuższych czasów flotacji (10÷20 min.), choć przyrosty zawartości miedzi w koncentracji w stosunku do rudy niemielonej są niewielkie.

Badania laboratoryjne pokazały też — co przedstawia rysunek 9 — że domielanie nadawy do flotacji uzupełniającej przynosi widoczny efekt w postaci wzrostu uzysku miedzi w koncentracji, a efektywniejszym czasem domielania jest czas 10 min. Domielanie takie przynosi zdecydowane efekty już przy bardzo krótkich czasach flotacji (1, 5 minut), natomiast mniejsze, ale istotne przyrosty uzysku dla czasów flotacji dłuższych (10, 15, 20, 25 minut). Jednocześnie widoczny jest zdecydowany wpływ czasu flotacji na końcową wartość uzysku, która przekracza 90% i to dla wszystkich czasów mielenia, choć i w tym przypadku dla czasu mielenia 10 minut uzysk osiąga największą wartość. Zauważyć trzeba negatywny wpływ na efekty flotacji zarówno niedomielenia nadawy (5 min.), jak i jej przemielenia (20 min.), zwłaszcza w zakresie dłuższych czasów flotacji (15, 20, 25 min.).

Symulacyjne badanie wariantu 1, w którym zdecydowanie zwiększył się wychód klasy najdrobniejszej w nadawie oraz zawartość miedzi w tej klasie, pokazuje, że skutecznym działaniem w takiej sytuacji dla podwyższenia zawartości miedzi w koncentracji flotacyjnym jest domielanie nadawy w celu uwolnienia znajdujących się w najdrobniejszej klasie dużej ilości minerałów miedzionośnych. Jak pokazuje rysunek 6, im dłuższy czas mielenia nadawy, tym wyższe i to zdecydowanie zawartości miedzi w koncentracji. Przyrosty zawartości są dość regularne dla różnych czasów mielenia, ale także dla różnych czasów flotacji, nieznacznie spadając wraz z wydłużaniem czasu flotacji. Generalnie jednak w takiej sytuacji (wariant 1) nie można uzyskać koncentratu o zawartości uzyskiwanej w badaniach laboratoryjnych.

Przedstawione zaś na rysunku 10 wyniki symulacji dla tego wariantu pokazują także, że w takiej sytuacji należy liczyć się ze zdecydowanym obniżeniem uzysku miedzi w koncentracji i to niezależnie od długości czasu flotacji uzupełniającej. Wyraźną poprawę efektów, choć bez możliwości uniknięcia końcowych strat metalu, może przynieść domielanie w czasie 10 min. i tak już drobniejszej nadawy. Przyrost uzysku jest widoczny — dla tego czasu mielenia — dla każdego czasu flotacji tej nadawy. Domielanie zarówno w krótszym czasie 5 min. jak i w długim czasie przynosi prawie w całym zakresie czasów flotacji wpływ negatywny na wyniki uzysku.

Analizując założenia tego wariantu, można stwierdzić na podstawie wyników przeprowadzonej symulacji, że wzrost zawartości miedzi w klasach najdrobniejszych nie pozawala na jej skuteczne wyflotowanie do koncentratu, co powoduje zdecydowane obniżenie uzysku miedzi.

Wyniki symulacji dla wariantu 2 przedstawia rysunek 7. Widać, że tylko krótkie mielenie (5 minut) poprawia jakość koncentratu i to tylko w zakresie krótkich czasów flo-

tacji — 1 min., 5 min. Dłuższe mielenie nadawy przynosi dość zdecydowane pogorszenie jakości koncentratu niezależnie od czasu trwania flotacji. W zakresie wszystkich czasów flotacji zawartość miedzi w koncentracie jest nieznacznie niższa przy mieleniu w czasie 5 minut niż w badaniach laboratoryjnych.

Symulacja wariantu 2, dla uzysku, wyniki której pokazano na rysunku 11, mówi, że zwiększenie wychodu klasy najgrubszej w nadawie można skutecznie zniwelować przez jej domielanie w czasie 10 minut, co daje już efekty w postaci zdecydowanego przyrostu uzysku dla krótkich czasów flotacji (1 i 5 min.). Mniejsze efekty przynosi takie domielanie z zastosowaniem długich czasów flotacji. Długie czasy flotacji pozwalają zaś w tym przypadku na uzyskanie wysokich wartości uzysku końcowego.

W wariacie 3, dla którego wyniki uzyskane na drodze symulacyjnej przedstawiono na rysunku 8, trudne jest uzyskanie poprawy jakości koncentratu poprzez domielanie nadawy. Tylko w przedziale krótkich czasów flotacji (1, 5 min.) uzyskuje się nieznaczne podwyższenie zawartości miedzi w uzyskiwanym koncentracie flotacyjnym poprzez domielanie. Dla długich czasów flotacji im dłuższe mielenie nadawy, tym niższa zawartość miedzi w uzyskiwanym koncentracie. Natomiast długie czasy flotacji przynoszą efekty w postaci wysokiej zawartości miedzi w koncentracie dla nadawy niedomielonej w porównaniu z wynikami uzyskiwanymi w badaniach laboratoryjnych.

W wariacie 3 (symulacja uzysku — rys. 12), w którym obok wzrostu wychodu klas grubych w nadawie wzrasta także zawartość miedzi zawartej w nieuwolnionych minerałach, który okazuje się podobny do 2, poprawę w postaci przyrostu uzysku w stosunku do flotacji nadawy niedomielonej przynosi domielanie nadawy w czasie 10 minut, natomiast dłuższe czasy flotacji pozwalają na osiągnięcie wysokich, najwyższych z wszystkich wariantów, wartości uzysku.

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona na podstawie badań laboratoryjnych i przemysłowych, z wykorzystaniem modeli blokowych, transmitancyjnych oraz programu Simulink Matlab, symulacyjna analiza zaproponowanego schematu technologicznego pozwala na wybór w różnych sytuacjach technologicznych rozwiązań najlepszych. Przebadane warianty obrazują takie sytuacje. Uzyskano wyniki, które pozwalają — w zależności od sytuacji — wybrać właściwe parametry procesu, tj. czas mielenia i flotacji, dają także możliwość ilościowej oceny możliwych do uzyskania efektów technologicznych, a więc umożliwiają optymalny wybór działań. W zasadniczej części badań symulacyjnych zakres badań obejmował stany ustalone procesów, choć parametr czasu (mielenia, flotacji) był głównym parametrem, jednakże przyjmowano jego ustalone wartości.

Zaprezentowana metoda badań symulacyjnych i wykorzystywany program są jeszcze bardziej przydatne w badaniu dynamiki procesów, a więc przebiegów i ich parametrów w stanach przejściowych (dynamicznych).

Przeprowadzone badania symulacyjne obok wniosków szczegółowych dotyczących procesu technologicznego pozwalają także na sformułowanie wniosków o charakterze ogólnym:

- 1) Modelowanie schematu technologicznego przy pomocy modeli blokowych oraz transmitancyjnych przy zastosowaniu programów symulacyjnych może być podstawą wyboru optymalnych struktur schematu technologicznego oraz jego parametrów.
- 2) Symulacyjne metody modelowania pozwalają na pełniejsze, bezinwazyjne i tanie badanie i projektowanie układów technologicznych — potwierdzają to powszechne w świecie zastosowania takich metod w badaniach technologicznych procesów przerobczych.

LITERATURA

- [1] *Brzózka J., Dorobczyński L.*: Programowanie w Matlab. Warszawa, MIKOM 1998
- [2] *Gajda J., Szyper M.*: Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych. Kraków, WEAIiE AGH, 1998
- [3] *Klempka R., Stankiewicz A.*: Modelowanie i symulacja układów dynamicznych. UWND AGH 2004
- [4] *Konieczny A.*: Technologie wzbogacania i ich modele matematyczne dla trudnowzbogacalnych frakcji rud miedzi z rejonu Polkowice-Sieroszowice. Rozprawa Doktorska AGH 2006
- [5] *Mrozek B., Mrozek Z.*: Matlab 6. Poradnik użytkownika. Warszawa, PLJ 2001
- [6] *Osiowski J.*: Zarys rachunku operatorowego. Warszawa, WNT 1972
- [7] Pod redakcją *Tumidajskiego T.*: Modelowanie matematyczne układów technologicznych przeróbki surowców mineralnych. Kraków, Wydawnictwo IGSMiE PAN 2004
- [8] *Polański Z.*: Metodyka badań doświadczalnych. Politechnika Krakowska 1978
- [9] *Trybalski K.*: Określenie transmitancyjnych modeli urządzeń przerobczych na podstawie ich przemysłowych charakterystyk czasowych. Wydawnictwo AGH 1998
- [10] *Trybalski K.*: Transmitancyjne modelowanie dynamiki procesów przeróbki kopalin. Zeszyty Politechniki Śląskiej, 1399, Górnictwo, 238, 1998
- [11] *Zalewski A., Cegiela R.*: Matlab — obliczenia numeryczne i ich zastosowanie. Poznań, Wydawnictwo Naukowe 1997
- [12] *Zeigler B.P.*: Teoria modelowania i symulacji. Warszawa, PWN 1984

