

25

DOBÓR PARAMETRÓW REGULATORA PI W UKŁADZIE STEROWANIA ODBIOREM PRODUKTU DOLNEGO W OSADZARCE – WYBRANE PROBLEMY

25.1 WSTĘP

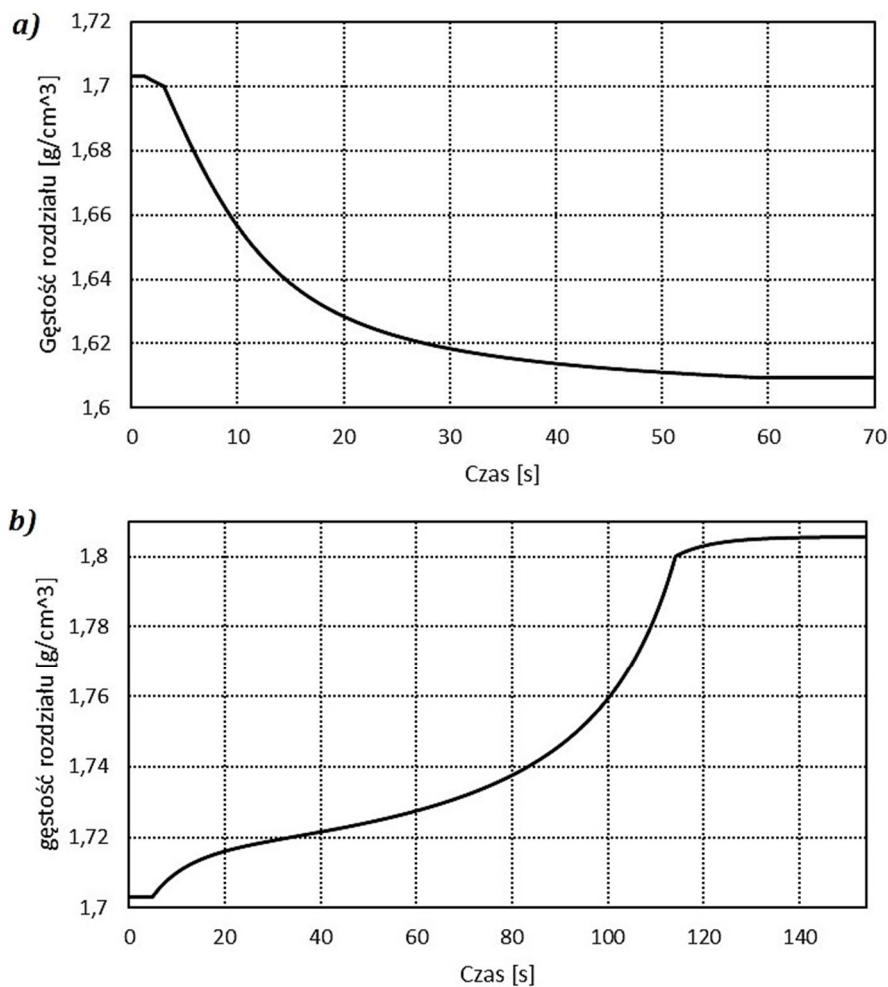
Większość procesów wzbogacania kopalin charakteryzuje się znaczną nieliniowością. Zostały one opisane między innymi w [4, 9, 11]. Jednym z takich procesów jest wzbogacanie węgla w osadzarkach. Urządzenia te są powszechnie stosowane w zakładach przeróbki kopalin ze względu na ich niezawodność oraz szeroki zakres klas ziarnowych nadawy, mogącej być poddanej operacji wzbogacania.

Budowa oraz zasada działania osadzarek pulsacyjnych została opisana między innymi w [3, 7]. Wskutek zmiany gęstości rozdziału, zmienia się gęstość koncentratu i w związku z tym, zawartość popiołu A_k w nim zawartego. Metody pomiaru parametrów jakościowych węgla, między innymi właśnie zawartości popiołu, zostały opisane w [3]. Własności dynamiczne osadzarki jako obiektu regulacji oraz model dynamiczny strefy odbioru produktów zostały przedstawione w monografii [7]. Symulacyjne modele statyczne wielu procesów wzbogacania obszernie omówiono natomiast w [6].

Jak wykazano w [1], w zależności od zmian udziału poszczególnych klas ziarnowych w nadawie konieczna jest cykliczna zmiana zadanej gęstości rozdziału, w celu uzyskania parametrów jakościowych produktu zadowalających odbiorcę. Dlatego też istotne jest zagadnienie zastosowania sterowników przemysłowych, realizujących algorytmy sterowania, zapewniające odpowiednią dynamikę całego procesu. Jednym z takich algorytmów jest algorytm PI (proporcjonalno-całkujący). Własności regulatorów PI oraz metody doboru nastaw opisano w [12, 14]. Jednym z powszechnych rozwiązań jest stosowanie regulatorów cyfrowych. Pozwalają one na dość swobodne dostosowanie części programowej do właściwości danego procesu. Metody doboru nastaw regulatorów cyfrowych, a także sposoby realizacji poszczególnych algorytmów przedstawiono między innymi w [2, 8].

25.2 STREFA ODBIORU OSADZARKI JAKO OBIEKT REGULACJI

W osadzarce rozdział nadawy na koncentrat oraz odpady dokonuje się w strefie odbioru, gdzie następuje rozwarstwienie poszczególnych frakcji nadawy ze względu na ich gęstość. Poprzez zmianę natężenia odbioru produktu dolnego (odpadów), zmienia się gęstość koncentratu, wydostającego się ponad progiem przelewowym. Tym samym zmianie ulega gęstość rozdziału, od której zależy zawartość popiołu. W celu pomiaru położenia frakcji o gęstości rozdziału stosuje się czujnik pływakowy. Obecnie współpracować on może z gęstościomierzem radiometrycznym, dokonującym pomiaru gęstości warstwy znajdującej się na wysokości progów. Budowę oraz właściwości metrologiczne czujnika pływakowego oraz gęstościomierza radiometrycznego opisano w [3]. Jak wykazano w [5], model symulacyjny strefy odbioru jest nieliniowy. Parametry dynamiczne obiektu są inne dla różnych zmian wielkości wejściowej, czyli natężenia przepływu produktu dolnego (rys. 25.1). Parametry te będą zmieniać się również pod wpływem zmian charakterystyki nadawy.



Rys. 25.1 Zmiana gęstości rozdziału osadzarki w odpowiedzi na zmiany natężenia odbioru produktu dolnego (punkt pracy - $Q_d = 140 \text{ Mg/h}$):

a) $Q_d = 160 \text{ Mg/hw}$ chwili $t = 1 \text{ s}$,

b) $Q_d = 120 \text{ Mg/h}$ w chwili $t = 5 \text{ s}$

Z wykresów na rys. 25.1b wynika, iż osadzarkę można opisać aproksymacyjną transmitancją obiektu inercyjnego z opóźnieniem:

$$K(s) = \frac{\rho_r(s)}{Q_d(s)} = \frac{k_{os} e^{-s\tau}}{sT + 1} \quad (25.1)$$

gdzie:

$K(s)$ – transmitancja operatorowa,

ρ_r – gęstość rozdziału,

Q_d – natężenie przepływu produktu dolnego,

K_{os} – wzmacnienie obiektu,

T – stała czasowa obiektu [s],

τ – opóźnienie czasowe [s].

Wartości stałej czasowej oraz opóźnienia dla ujemnych zmian wielkości wejściowej są kilkukrotnie większe, niż dla zmian dodatnich. W omawianym przypadku wartości wzmacnienia są zbliżone. Wszystkie parametry modelu zależne są od charakterystyki nadawy (natężenie przepływu, ilość oraz udział frakcji gęstościowych) oraz od parametrów technicznych osadzarki (wymiary strefy odbioru, wydajność).

25.2 DYSKRETNY REGULATOR PI

Wzbogacanie węgla w osadzarce jest procesem wolnozmiennym, w celu sterowania nim zasadne jest więc zastosowanie regulatora z algorytmem PI. Postać cyfrowego regulatora proporcjonalno – całkującego w postaci przyrostowej (prędkościowej) wyrazić można wzorami:

$$u(n) = u(n-1) + \Delta u(n)$$

$$\Delta u(n) = k_p \left\{ e(n) - e(n-1) + \frac{T_s}{T_i} e(n) \right\} \quad (25.2)$$

gdzie:

e – błąd regulacji,

u – sygnał wyjściowy regulatora,

k_p – wzmacnienie członu proporcjonalnego regulatora,

T_i – czas zdwojenia regulatora,

T_s – okres próbkowania.

Doboru wartości nastaw dokonać można na podstawie wielu reguł wiążących je z parametrami obiektu regulacji. Metody te opisano w [14]. W przypadku obiektów nieliniowych, których parametry są zmienne, przy różnych zmianach wartości zadanej może dochodzić do pogorszenia jakości regulacji (zbyt długi czas regulacji, duże przeregulowania itp.).

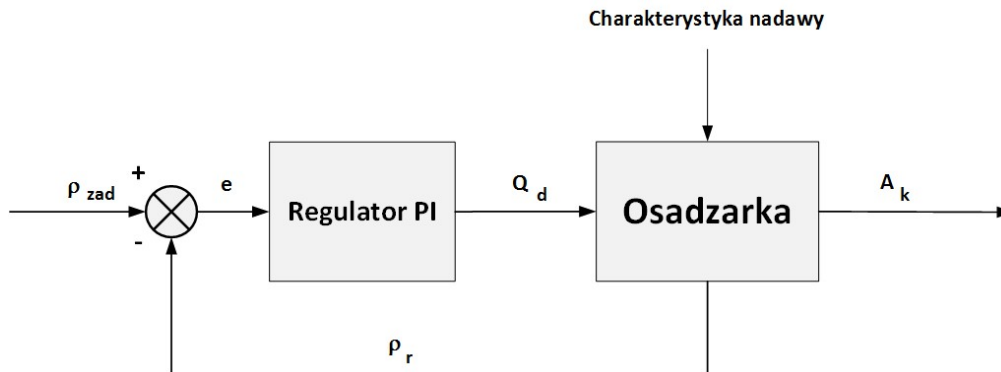
25.3 BADANIA SYMULACYJNE

25.3.1 Parametry osadzarki

Przeprowadzone zostały badania symulacyjne układu automatycznej regulacji

odbioru produktu dolnego dla zadanej gęstości rozdziału. Schemat blokowy układu regulacji przedstawiono na rys. 25.2. W rozpatrywanym przypadku parametry osadzarki były następujące:

- wydajność: 400 Mg/h,
- powierzchnia strefy odbioru: 3 m³,
- szerokość łoża osadzarki: 3 m,
- wysokość progu przelewowego: 30 cm.



Rys. 25.2 Schemat blokowy układu regulacji

Przyjęto charakterystykę nadawy przedstawioną w tabeli 25.1. Przyjęto też założenie upraszczające, iż prędkości poruszania się poszczególnych warstw w płaszczyźnie poziomej zmieniają się liniowo, przy czym największą prędkość posiada warstwa o najmniejszej gęstości.

Tabela 25.1 Charakterystyka nadawy

Gęstość frakcji g/cm ³	Wychód frakcji %	Zawartość popiołu %	Zawartość siarki całkowitej %	Wartość opałowa kJ/kg
< 1,30	12,15	4,67	0,84	30 680
1,30-1,35	17,96	7,40	0,86	29 630
1,35-1,40	10,95	10,99	0,97	27 300
1,40-1,50	8,47	17,92	1,10	25 750
1,50-1,60	7,43	26,61	1,24	22 550
1,60-1,70	7,02	35,81	1,25	19 160
1,70-1,80	3,95	43,81	1,13	16 220
1,80-1,90	4,04	51,03	1,12	13 560
1,90-2,00	2,57	57,08	1,39	11 330
> 2,00	25,45	75,84	2,75	4 420
Razem	100,00	33,67	1,46	1960

25.3.2 Dobór parametrów regulatora

W celu doboru nastaw regulatora wykorzystano metodę Zieglera-Nicholsa. Przyjęto czas całkowania $T_s = 1$ s. Parametry obiektu, niezbędne do wyznaczenia nastaw, wyznaczono na podstawie wykresu 25.1a:

- $k_{ob} = 0,005$,
- $T = 12$ s,
- $T = 5$ s.

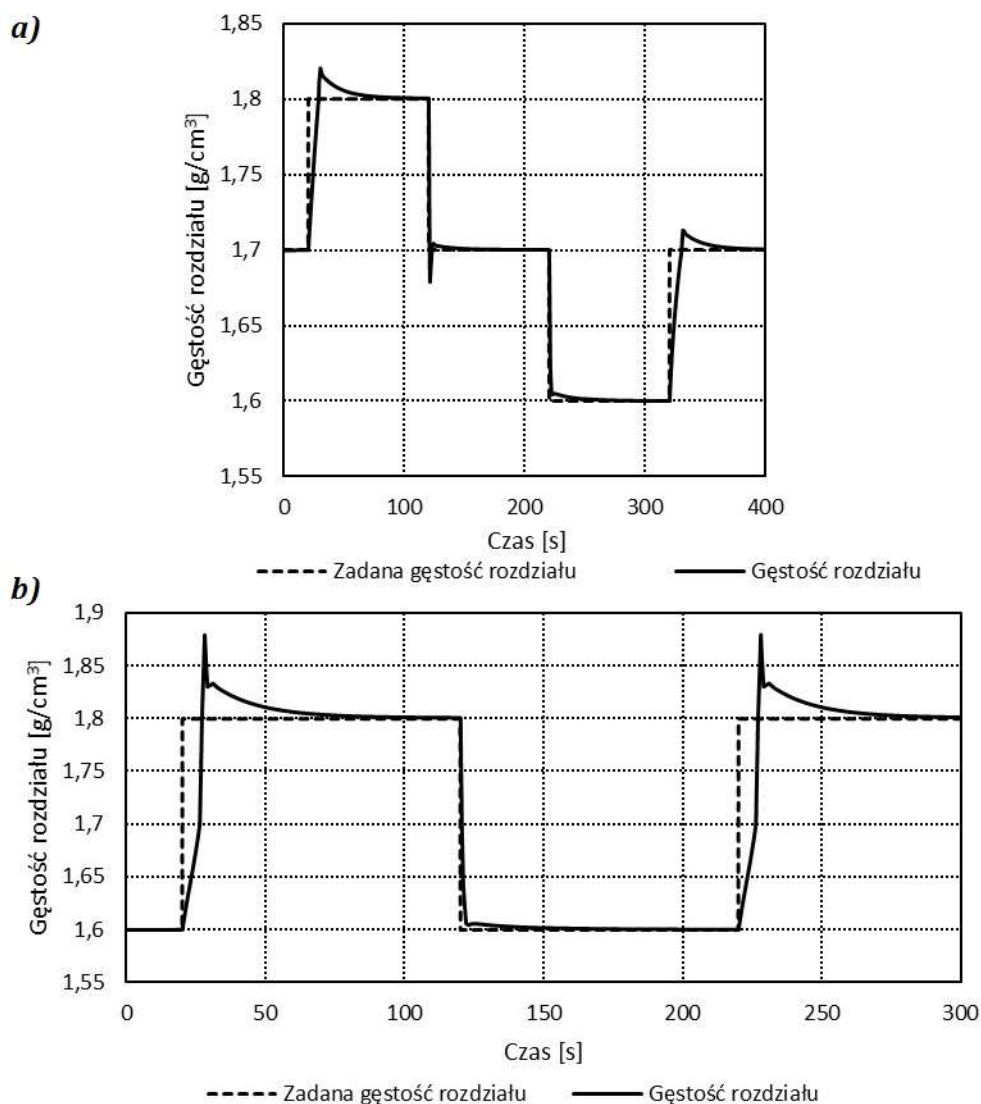
Wartości nastaw regulatora:

- $k_p = 432$,
- $T_i = 15$ s.

Dla dobranych parametrów regulatora dokonano analizy dwóch przypadków:

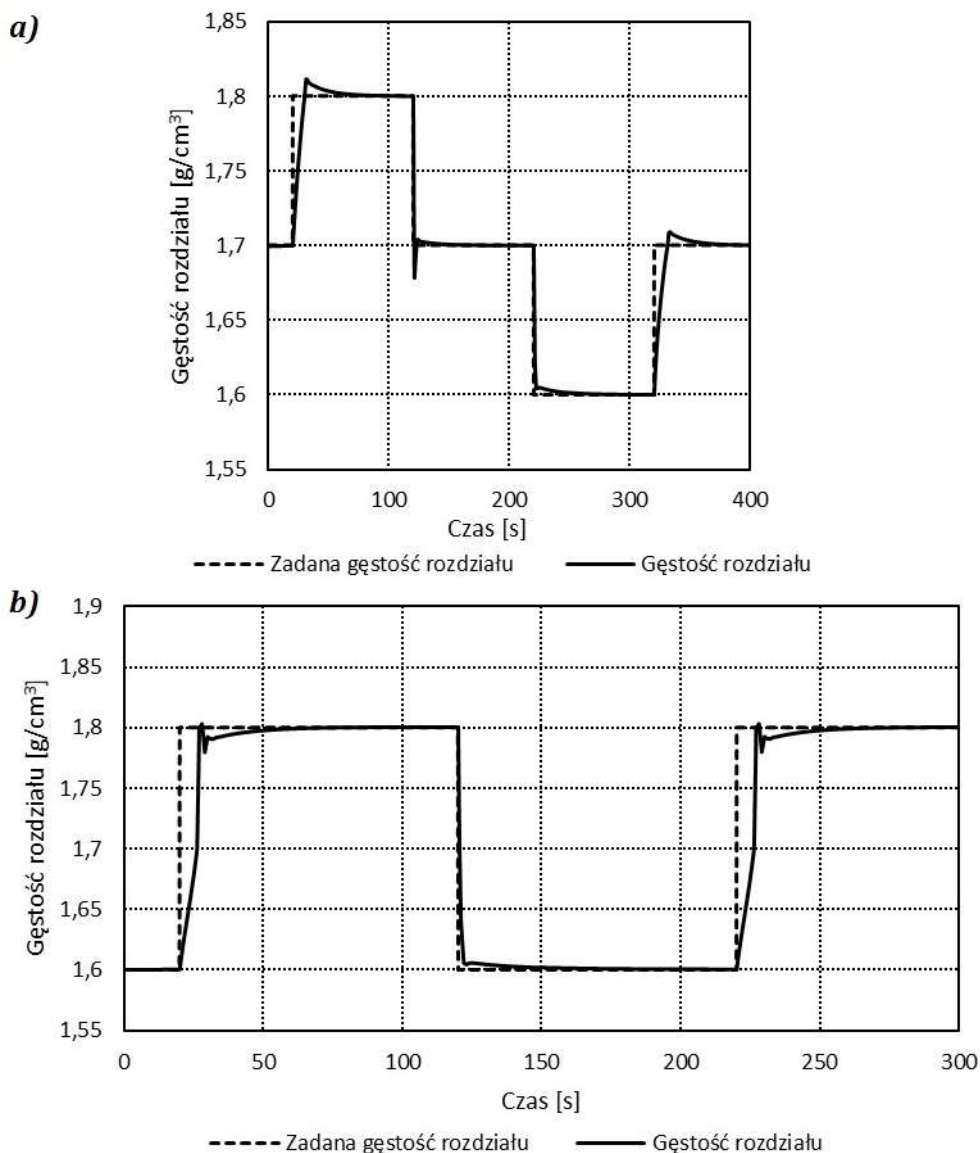
- przypadek I – zadana gęstość rozdziału zmienia się najpierw z $1,7$ g/cm³ na $1,8$ g/cm³, następnie z $1,8$ g/cm³ na $1,7$ g/cm³, po czym z $1,7$ g/cm³ na $1,6$ g/cm³ oraz z $1,6$ g/cm³ na $1,7$ g/cm³
- przypadek II – zadana gęstość rozdziału zmienia się najpierw z $1,6$ g/cm³ na $1,8$ g/cm³, następnie z $1,8$ g/cm³ na $1,6$ g/cm³, po czym z $1,6$ g/cm³ na $1,8$ g/cm³

Przebiegi wartości regulowanej przedstawiono na wykresach (rys. 25.3a oraz 25.3b).



Rys. 25.3 Regulacja gęstości zadanej:
a) przypadek I, b) przypadek II.

Jak można zauważyć, dla dodatnich zmian wartości zadanej mogą występować znaczne przeregulowania, dochodzące do 30%. Czas regulacji również ulega wydłużeniu. Wynika to z faktu przyjęcia do obliczeń parametrów obiektu dla dodatnich zmian natężenia przepływu produktu dolnego, które powodują zmniejszenie wartości gęstości rozdziału. Na podstawie przedstawionych przebiegów można też stwierdzić, iż najlepsze efekty uzyskuje się dla ujemnych zmian zadanej gęstości rozdziału do wartości $1,6 \text{ g/cm}^3$. Tłumaczyć można to tym, że nastawy regulatora były dobierane na podstawie odpowiedzi układu z wykresu 1, dla której w stanie ustalonym gęstość rozdziału jest równa właśnie tej wartości.



Rys. 25.4 Regulacja gęstości zadanej (r. przyrostowy):
a) przypadek I, b) przypadek

Wobec powyższych problemów rozważono układ regulacji z wykorzystaniem algorytmu pozycyjnego:

$$u(n) = k_p \left\{ e(n) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{k=1}^n e(k) \right\} \quad (25.3)$$

gdzie:

T_s – okres próbkowania,

e – błąd regulacji,

u – sygnał wyjściowy regulatora,

$i = \{0, 1, 2, \dots, n\}$.

W algorytmie tym zastosowano ponadto układ *anti-windup*. Zapobiega on nadmiernemu wzrostowi sygnału w członie całkującym regulatora po przekroczeniu górnego lub dolnego ograniczenia sygnału sterującego. W momencie przekroczenia tych ograniczeń, całkowanie zostaje zatrzymane i przyjmuje ostatnią wartość, która wystąpiła, zanim sygnał sterujący przekroczył określony z góry poziom. Człon całkujący zaczyna sumować kolejne wartości błędów dopiero po powrocie sygnału w zadany zakres [12, 16]. Taki mechanizm pozwala na ograniczenie przeregulowań, wynikających z nasycenia sygnału wyjściowego regulatora. Dla tak dobranego regulatora rozpatrzono oba przypadki zmian zadanej gęstości rozdziału. Przebiegi czasowe przedstawiono na wykresach (rys. 25.4).

W tabeli 25.2 zestawiono porównanie wartości całki z kwadratu błędów (w ujęciu względnym) dla omówionych wariantów. Wyraża ją wzór:

$$J_2 = \int e^2 dt \quad (25.4)$$

gdzie:

e – błąd regulacji

Tabela 25.2 Wartości względnej całki z kwadratu błędów dla rozpatrywanych wariantów

	Algorytm przyrostowy	Algorytm pozycyjny (z kompensatorem)
Przypadek I	102%	100%
Przypadek II	103%	100%

25.4 PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych opisanego układu regulacji wysnuć można następujące wnioski:

- strefa odbioru produktów w osadzarce jest obiektem nieliniowym – właściwości dynamiczne różnią się w zależności od kierunku zmian wokół punktu pracy,
- jakość regulacji dla przyjętych nastaw regulatora PI zmienia się w zależności od wielkości zmian wartości zadanej,
- przy dużych zmianach dochodzi do nasycenia sygnału sterującego, co powodować może znaczne przeregulowania, pogarszające efekty regulacji,
- algorytm przyrostowy, mimo że łatwiejszy w implementacji, posiada ograniczenie w postaci braku możliwości przeciwdziałania zjawisku *windup*, wskutek czego powinien być stosowany tylko, gdy przewiduje się stosunkowo niewielkie zmiany wartości zadanej,
- w przypadku dużych zmian zadanej gęstości rozdziału bardziej korzystne efekty

daje zastosowanie algorytmu pozycyjnego – pozwala on na implementację jednego z wielu mechanizmów przeciwdziałania zbytniemu narastaniu sygnału całkującego, a tym samym na zapobieganie potencjalnym znacznym przeregulowaniom,

- zastosowany algorytm nie ma zbytniego wpływu na czas regulacji w omawianych przypadkach,
- wartość całki z kwadratu błędu nie zmienia się znacząco w przypadku zastosowania różnych algorytmów – wynika to z faktu zastosowania metody doboru nastaw regulatora zgodnie z metodą Zieglera-Nicholsa, zapewniającą odpowiednią dynamikę układu regulacji,
- zasadna jest dalsza analiza efektów zastosowania algorytmów z różnymi metodami kompensacji niekorzystnych zjawisk towarzyszących regulacji procesów o charakterze nieliniowym,
- w dalszej pracy badawczej przewidziana jest bardziej szczegółowa analiza układu regulacji z uwzględnieniem zakłóceń (zmiana natężenia przepływu nadawy, zmiana udziału poszczególnych klas ziarnowych oraz zmiany charakterystyki nadawy) dla różnych wariantów układów osadzarek.

LITERATURA

1. S. Boron, A. Heyduk and J. Pielot. "Zastosowanie wizyjnej analizy składu ziarnowego on-line nadawy do układów wzbogacania wielokrotnego w osadzarkach – ocena efektywności ekonomicznej", *Proceedings of the Mineral Engineering Conference*. MEC 2014, pp. 24-37.
2. J. Brzózka. "Regulatory cyfrowe w automatyce", Ed. Mikom, Warszawa, 2002.
3. S. Cierpisz. "Automatyczna regulacja procesu wzbogacania węgla w osadzarkach", Ed. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
4. S. Cierpisz. "Parametry jakości węgla – pomiary i sterowanie", Ed. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2005.
5. S. Cierpisz and R. Kaula. "Dobór parametrów regulatora dla obiektu inercyjnego z opóźnieniem na przykładzie osadzarki pulsacyjnej", *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, vol. 52, No. 3, 2014, pp. 5-13.
6. S. Cierpisz and J. Pielot. "Symulacyjne statyczne modele procesów i układów sterowania w zakładach wzbogacania węgla", Ed. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2001.
7. J. Dietrych. "Osadzarki", Ed. PWT, Katowice, 1953.
8. W. Grega. "Metody i algorytmy sterowania cyfrowego w układach scentralizowanych i rozproszonych", Ed. Wydawnictwo AGH, Kraków, 2004.
9. J. Joostberens. "Badania własności dynamicznych procesu flotacji węgla jako obiektu sterowania", *Automatyzacja procesów przeróbki kopalin*, APPK 2002. VIII Konferencja, Szczyrk, 2002, pp. 103-112.
10. R. Kaula. "Podstawy automatyki", Ed. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2005.
11. R. Kaula and W. Pielucha. "Układ regulacji produkcji mieszanek węgla z regulatorem cyfrowym – studium przypadku", *Mineralurgia i wykorzystanie surowców mineralnych*. III Polski Kongres Górniczy, Wrocław, 2015, pp. 16-19.

12. J. Kuźnik. "Regulatory i układy regulacji", Ed. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002.
13. J. Kwaśniewski. "Sterowniki PLC w praktyce inżynierskiej", Ed. Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2008.
14. A. O'Dwyer. "Handbook of PI and PID controller tuning rules", London, 2003.
15. J. Pielot and W. Pielucha. "Analysis of effects of coal enrichment in jigs at changing grain composition of the feed", *Mininig - Informatics, Automation and Electrical Engineering*, vol. 54, No. 2, 2016, pp. 48-54.
16. W. Pielucha. "Metody ograniczania sygnału wyjściowego w cyfrowych regulatorach PID", *Automatyka, telekomunikacja, informatyka*, ATI 2015, XL Konferencja Sekcji Cybernetyki w Górnictwie KG PAN, Szczyrk, 2015, pp. 147-153.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

mgr inż. Wojciech Pielucha

Politechnika Śląska

Wydział Górnictwa i Geologii

Katedra Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa

ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska

e-mail: wojciech.pielucha@polsl.pl

DOBÓR PARAMETRÓW REGULATORA PI W UKŁADZIE STEROWANIA ODBIOREM PRODUKTU DOLNEGO W OSADZARCE – WYBRANE PROBLEMY

Streszczenie: W pracy krótko scharakteryzowano strefę odbioru osadzarki jako obiekt regulacji. Opisano przyjęty w celach badawczych przyrostowy algorytm cyfrowego regulatora PI. Omówiono też problemy związane z doбором nastaw cyfrowego regulatora PI. Następnie, w celach symulacyjnych, dobrano nastawy regulatora na podstawie zidentyfikowanych parametrów zastępczego liniowego modelu obiektu. W dalszej części referatu rozpatrzono dwa przypadki zmian zadanej gęstości rozdziału. W celu dokonania analizy porównawczej, zastosowano algorytm pozycyjny z kompensatorem zjawiska windup. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono w postaci wykresów przebiegów czasowych wartości regulowanej. Na koniec porównano efekty regulacji dla obu przyjętych algorytmów.

Słowa kluczowe: wzbogacanie węgla w osadzarce, regulator PI, zjawisko windup

TUNING OF THE PI CONTROLLER IN DISCHARGE OF PRODUCTS CONTROL SYSTEM IN JIG - SELECTED ASPECTS

Abstract: The study briefly characterized the jig distribution zone as an control object. Accepted for research purposes, incremental algorithm of the digital PI controller has been described. Also, issues related to setting the digital PI controller have been discussed. Then, for the purpose of simulation, controller settings based on the identified parameters of linear model has been chosen. In the rest of the paper two cases of changes to the separation density were examined. In order to make a comparative analysis, positional algorithm with the anti-windup compensator has been used. The results of simulation studies were presented in graphical timelines of the control variable. At the end, the effects of control for both algorithms were compared.

Key words: coal enrichment in jig, PI controller, windup phenome