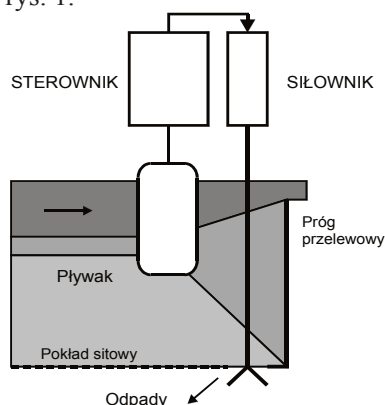


Dobór parametrów regulatora dla obiektu inercyjnego z opóźnieniem na przykładzie osadzarki pulsacyjnej

W artykule przedstawiono wybrane metody doboru nastaw regulatorów PI dla obiektu inercyjnego z opóźnieniem. Na podstawie dynamiki pływakowego układu regulacji odbioru produktu dolnego w osadzarce węgla określono uproszczony model dynamiczny układu. W następstwie dokonano wyznaczenia parametrów regulatora. Porównano wyniki układu regulacji dla obiektu zlinearyzowanego i nieliniowego.

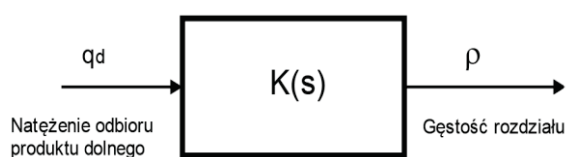
1. WSTĘP

Na potrzeby niniejszego artykułu analizie poddany został układ regulacji z opóźnieniem czasowym na przykładzie pływakowego układu regulacji odbioru produktu dolnego w osadzarce węgla [1], przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Pływakowy układ regulacji odbioru produktu dolnego w osadzarce [1]

Schemat blokowy obiektu regulacji przedstawiony jest na rys. 2.



Rys. 2. Strefa odbioru produktów jako obiekt regulacji [1]

W układzie regulacji położenie warstwy materiału o gęstości, która powinna być gęstością rozdziału, wskazywane jest przez położenie metalowego pływaka o odpowiednio dobranej gęstości. Układ sterowania odbiorem produktu dolnego utrzymuje pływak na zadanej wysokości, stabilizując w ten sposób położenie warstwy rozdzielczej i jednocześnie gęstość rozdziału na zadanej wartości. Pływak może być zastąpiony gęstościomierzem radiometrycznym mierzącym bezpośrednio gęstość rozdziału. Zakłada się, dla ujednoczenia analizy, że oba urządzenia pomiarowe zainstalowane są w ten sposób, że mierzą gęstość warstwy rozdziału na wysokości progu (gęstościomierz) lub położenie tej warstwy względem progu przelewowego.

Rzeczywista dynamiczna charakterystyka strefy odbioru w osadzarce o wydajności 300 Mg/h przedstawiona jest (dla pewnej charakterystyki wzbogacalności węgla) w tabeli 1.

Charakterystykę tę wyznaczono dla przykładowego punktu pracy określonego natężeniem przepływu odpadów $q_d = 100$ Mg/h i gęstości rozdziału, odpowiadającej temu przepływowi. Widać, że strefa odbioru produktów jest silnie nieliniowym elementem: skokowemu zmniejszeniu natężenia przepływu (-5, -10, -20 Mg/h) odpowiada narastający czas opóźnienia τ (60, 40, 20, 10 s) oraz całkujący charakter narastania gęstości rozdziału ρ z prędkością $k_i = 0,001$ g/cm³/s. Całkowanie osiąga stan ustalony (nasycenie) zależny od wielkości skoku wejściowego $\Delta\rho$ (0,01; 0,02; 0,04; 0,07 g/cm³). Odpowiednio skokowemu zwiększeniu natężeniu przepływu odbioru odpadów (produktu

dolnego) (5, 10, 15 Mg/h) odpowiada małe opóźnienie τ sygnału wyjściowego (10, 5, 1 s), narastająca szybkość całkowania k_i (-0,00025; -0,003; -0,1 g/cm³/s)

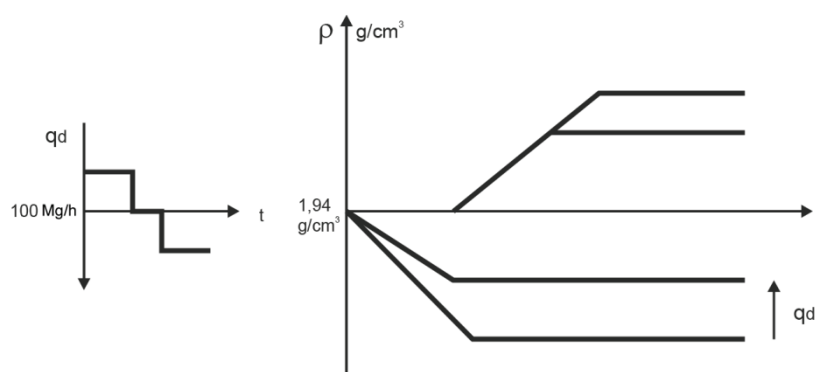
oraz nieliniowy wzrost osiągnięcia stanu ustalonego (nasylenia) $\Delta\rho$ (-0,01; -0,04; -0,1 g/cm³).

Tabela 1.

Charakterystyka strefy odbioru osadzarki OM24

	Zmiana skokowa $x = q_d, <g/h$ (punkt pracy: $q_d = 100 \text{ Mg/h}$)	Czas opóźnienia τ, s	Szybkość narastania k_i (g/cm ³)/s	Stan ustalony $\Delta\rho$ (nasylenie) (p. pracy: 1,94 g/cm ³)
1	-5	60	0,001	0,01
2	-10	40	0,001	0,02
3	-20	20	0,001	0,04
4	-30	10	0,001	0,07
5	5	10	-0,00025	-0,01
6	10	5	-0,003	-0,04
7	15	1	-0,01	-0,1

Charakterystyka dynamiczna strefy odbioru przedstawiona jest na rys. 3.



Rys. 3. Nieliniowa charakterystyka dynamiczna strefy odbioru

W celu doboru przybliżonych nastaw regulatora w analizowanym układzie sterowania przyjmujemy następującą uproszczoną i zlinearyzowaną charakterystykę strefy odbioru:

– dla ujemnej zmiany sygnału wejściowego (wokół punktu pracy):

$$K_-(s) = \frac{k_-}{1 + sT_-} e^{-s\tau_-} \quad (1)$$

– dla dodatniej zmiany sygnału wejściowego:

$$K_+(s) = \frac{k_+}{1 + sT_+} e^{-s\tau_+} \quad (2)$$

Wzory (1), (2) opisują, w postaci operatorowej, właściwości dynamiczne obiektu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem. Obiekt o takich właściwościach scharakteryzowany jest trzema parametrami: wzmocnieniem statycznym k , stałą czasową T , czasem opóźnienia τ . Na podstawie danych z tabeli 1. (charakterystyk dynamicznych strefy odbioru) przy-

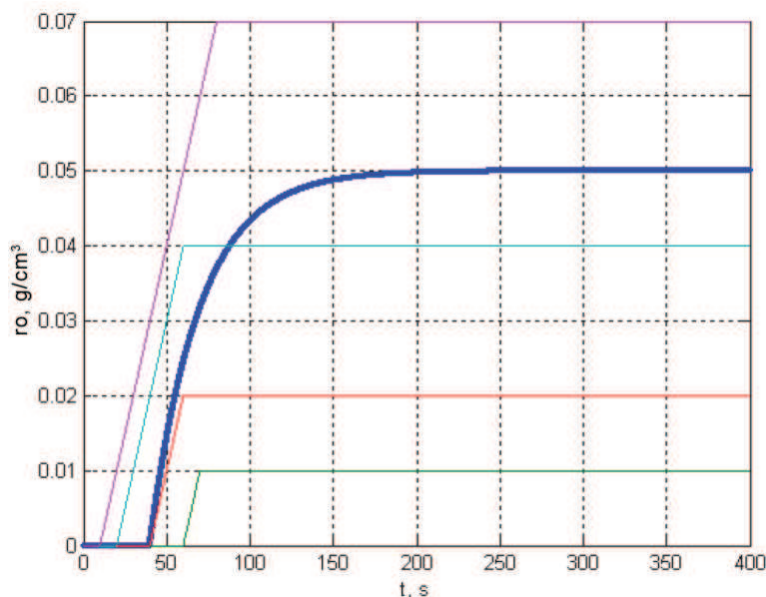
jęto wartości parametrów modeli zlinearyzowanych przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2.

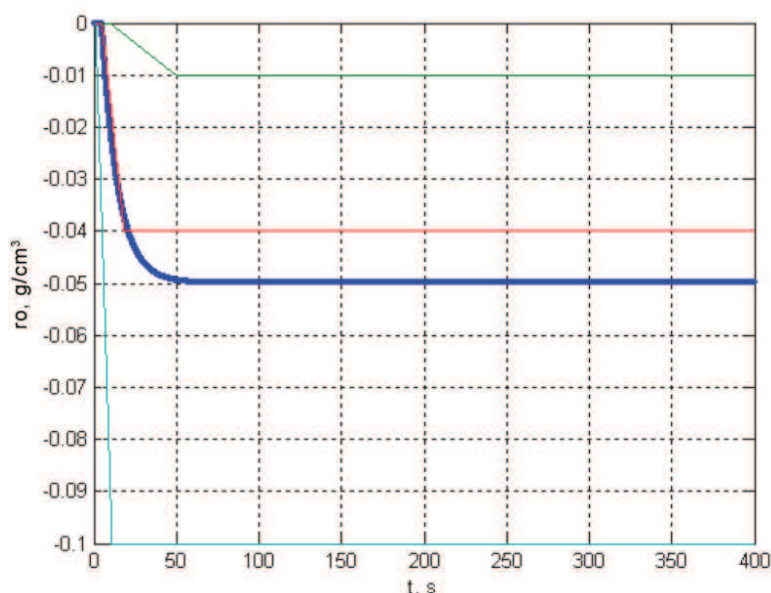
Wartości parametrów modeli zlinearyzowanych

Model	$k, (g/cm^3)/(Mg/h)$	T, s	τ, s
$K_-(s) = \frac{k_-}{1 + sT_-} e^{-s\tau_-}$	0,002	30	40
$K_+(s) = \frac{k_+}{1 + sT_+} e^{-s\tau_+}$	0,005	10	5

Na rys. 4. i 5. przedstawiono odpowiedź obiektu zlinearyzowanego na skokową dodatnią i ujemną zmianę natężenia przepływu odpadów q_d . Charakterystykę dynamiczną zastępczą modelu porównano z charakterystykami rzeczywistymi otrzymanymi dla różnych skokowych zmian natężenia odbioru produktu dolnego.



Rys. 4. Odpowiedź obiektu zlinearyzowanego dla skokowej zmiany natężenia $q_d = -25 \text{ Mg/h}$



Rys. 5. Odpowiedź obiektu zlinearyzowanego dla skokowej zmiany natężenia $q_d = 10 \text{ Mg/h}$

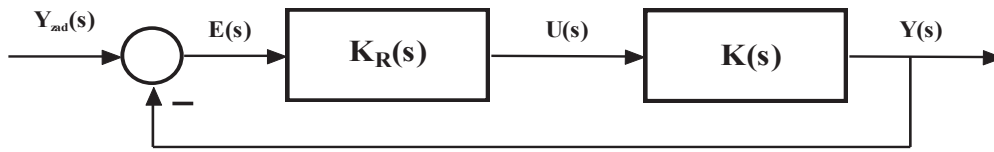
2. WYBRANE METODY DOBORU NASTAW REGULATORA PI

Regulatory PI (proporcjonalno-całkujący) oraz PID (proporcjonalno-całkująco-różniczkujący) są stosowane w wielu procesach przemysłowych. Ich szerokie zastosowanie wynika z dobrych właściwości jakości regulacji do kompensacji szeregu zakłóceń występujących w procesach przemysłowych oraz prostej budowy (tym samym łatwej implementacji). Wybór struktury PI albo PID regulatora zależy od właściwości dynamicznych sterowanego procesu,

zakłóceń oddziałujących na ten proces oraz wymagań stawianych układowi regulacji (scharakteryzowanych wskaźnikami jakości regulacji) [5].

Ze względu na szereg zakłóceń występujących w procesach przerobczych węgla stosowanie członu różniczkującego regulatora PID powinno być ograniczone na przykład do stabilizacji wybranych parametrów w sterowaniu lokalnym. Celowym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie struktury PI regulatora w układzie regulacji.

Na rys. 6. przedstawiono schemat blokowy pływakowego układu regulacji odbioru produktu dolnego w osadzarce.



Rys. 6. Schemat blokowy układu regulacji

W układzie tym wielkość $Y(s)$ odpowiada gęstości rozdziału (przedstawionej w postaci operatorowej), natomiast wielkość $U(s)$ – odpowiednio natężeniu przepływu produktu dolnego. Transmitancja obiektu $K(s)$ opisuje dynamikę procesu (po zlinearyzowaniu) zgodnie ze wzorami (1), (2). Regulator PI ma strukturę podaną za pomocą transmitancji $K_R(s)$:

$$K_R(s) = k_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = k_r \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \quad (3)$$

gdzie:

k_r – wzmacnienie członu proporcjonalnego,
 T_i – czas zdwojenia członu całkującego.

W celu uzyskania odpowiedniej odpowiedzi wielkości regulowanej procesu ważnym zagadnieniem jest dobór parametrów regulatora. Za jedną z podstawowych metod doboru regulatora PI o transmitancji (1), (2) przyjmuje się metodę Zieglera-Nicholsa (zwaną metodą testu identyfikacyjnego) [4].

Wielu autorów zajmujących się doбором nastaw parametrów regulatorów PI dla procesów o dynamice obiektu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem proponuje nastawy oparte o redukcję stałej czasowej [3]. W metodach tych przyjmuje się, że parametr T_i członu całkującego regulatora jest równy stałej czasowej obiektu $T_i = T$. Różnice w nastawach wynikają z przyjętych kryteriów doboru parametru k_r . Jednym z podstawowych kryteriów stosowanych do doboru nastaw jest odpowiedź przebiegu przejściowego wielkości regulowanej na zadaną wartość stałą. W artykule wyznaczono nastawę parametru k_r dla założenia dotyczącego przebiegu aperiodycznego krytycznego wielkości regulowanej.

Sposób wyznaczenia parametru k_r jest następujący. Transmitancja układu otwartego $K_o(s)$, przy założeniu $T_i = T$, ma postać:

$$K_o = K(s)K_R(s) = \frac{k}{T_s + 1} e^{-s\tau} k_r \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) = \frac{k k_r}{T_s} e^{-s\tau} \quad (4)$$

Wykorzystując aproksymację Pade pierwszego stopnia do opisu wyrażenia $e^{-s\tau}$:

$$e^{-s\tau} \approx \frac{1 - \frac{\tau}{2} s}{1 + \frac{\tau}{2} s}, \quad (5)$$

można transmitancję operatorową układu otwartego przedstawić następująco:

$$K_o = \frac{k k_r}{T_s} e^{-s\tau} = \frac{k k_r}{T} \frac{\left(-\frac{\tau}{2} s + 1 \right)}{s \left(\frac{\tau}{2} s + 1 \right)} k_z \frac{\left(-\frac{\tau}{2} s + 1 \right)}{s \left(\frac{\tau}{2} s + 1 \right)} \quad (6)$$

gdzie: $k_z = \frac{k k_r}{T}$

Zatem transmitancja układu zamkniętego:

$$K_{zam}(s) = \frac{K_o(s)}{1 + K_o(s)} \quad (7)$$

po podstawieniu wzoru (6) jest następująca:

$$K_{zam}(s) = \frac{k_z \frac{\left(-\frac{\tau}{2} s + 1 \right)}{s \left(\frac{\tau}{2} s + 1 \right)}}{1 + k_z \frac{\left(-\frac{\tau}{2} s + 1 \right)}{s \left(\frac{\tau}{2} s + 1 \right)}} = \frac{k_z \left(-\frac{\tau}{2} s + 1 \right)}{s \left(\frac{\tau}{2} s + 1 \right) + k_z \left(-\frac{\tau}{2} s + 1 \right)} = \frac{k_z \left(-\frac{\tau}{2} s + 1 \right)}{\frac{\tau}{2} s^2 + \left(1 - k_z \frac{\tau}{2} \right) s + k_z} \quad (8)$$

Uzyskanie przebiegu aperiodycznego krytycznego wielkości regulowanej (na zadaną wartość stałą) jest związane z warunkiem $\Delta = 0$, wynikającym z kryterium pierwiastkowego. Zatem dla równania charakterystycznego:

$$\frac{\tau}{2}s^2 + (1 - k_z \frac{\tau}{2})s + k_z = 0 \Rightarrow \Delta = (1 - k_z \frac{\tau}{2})^2 - 4 \frac{\tau}{2} k_z \quad (9)$$

uzyskujemy:

$$\Delta = 0 \Rightarrow (1 - k_z \frac{\tau}{2})^2 - 4 \frac{\tau}{2} k_z = 0 \quad (10)$$

W rozwiązaniu otrzymujemy dwie wartości k_z , przy czym warunek stabilności spełnia tylko jedna wartość:

$$k_z = \frac{2(3 - 2\sqrt{2})}{\tau} \cong \frac{0,34}{\tau} \quad (11)$$

Tym samym nastawy regulatora PI są następujące:

$$k_r = 0,34 \frac{T}{k\tau} \quad (12)$$

$$T_i = T \quad (13)$$

W artykule dokonano porównania wyników regulacji stabilizacyjnej dla nastaw regulatora PI wyznaczonych trzema różnymi metodami: metodą Zieglera-Nicholsa (ZN), metodą redukcji stałej czasowej z warunkiem dotyczącym przebiegu wielkości regulowanej (R) oraz metodą bezpośrednią z warunkiem na zapas fazy (B). Sposób wyznaczenia nastaw regulatora PI metodą bezpośrednią został szczegółowo omówiony w pracy [2].

W tabeli 3. przedstawiono zależności wiążące wartości parametrów regulatora PI z parametrami transmitancji operatorowej obiektu dla zastosowanych metod doboru.

Tabela 3.

Nastawy parametrów regulatora PI

Metoda doboru nastaw	k_r	T_i
Zieglera-Nicholsa (ZN)	$0,9 \frac{T}{k\tau}$	$3,33\tau$
Redukcji stałej czasowej z warunkiem dotyczącym przebiegu wielkości regulowanej (R)	$0,34 \frac{T}{k\tau}$	$T_i = T$
Bezpośrednia z warunkiem na zapas fazy (B)	$0,52 \frac{T}{k\tau}$	$T_i = T$

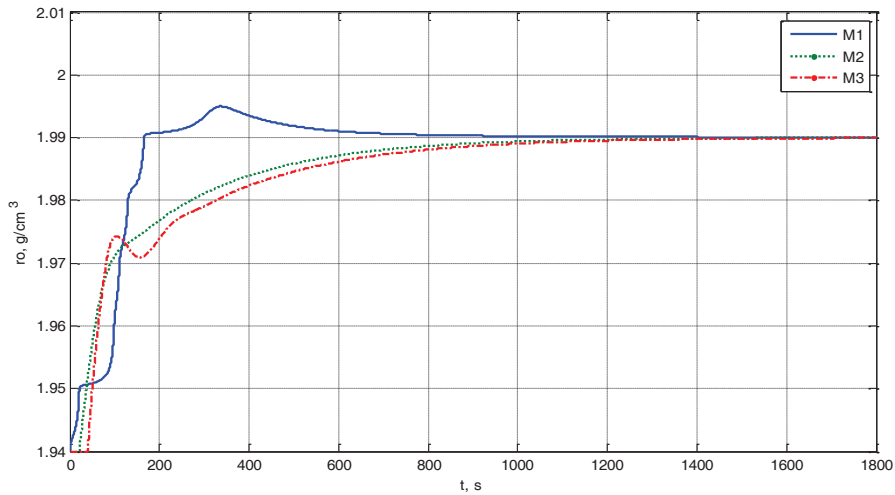
3. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Na podstawie zależności przedstawionych w tabeli 3. oraz wartości parametrów modeli zlinearyzowanych (tab. 2) wyznaczono wartości nastaw parametrów regulatora PI dla trzech metod doboru. Do analizy przyjęto trzy modele dynamiki obiektu:

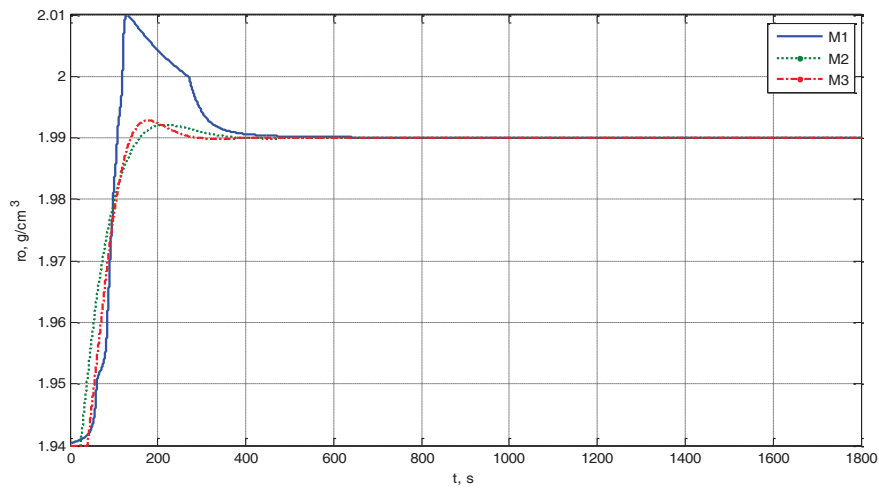
– model nielinearyzowany oznaczony na rysunkach jako M1. Model ten opisany jest wartościami parametrów podanymi w tabeli 1. oraz poglądowo przedstawionymi charakterystykami dynamicznymi (rys. 3). Modelowi temu odpowiada jego symulacyjna wersja przedstawiona w pracy [1];

- model zlinearyzowany ze zmiennymi parametrami k , T , τ (w zakresach podanych w tabeli 1.) oznaczony jako M2. Model ten opisany jest przez równania (1) i (2) z parametrami $k(q_d)$, $T(q_d)$ i $\tau(q_d)$;
- model zlinearyzowany ze stałymi parametrami k , T , τ (tab. 2) oznaczony jako M3.

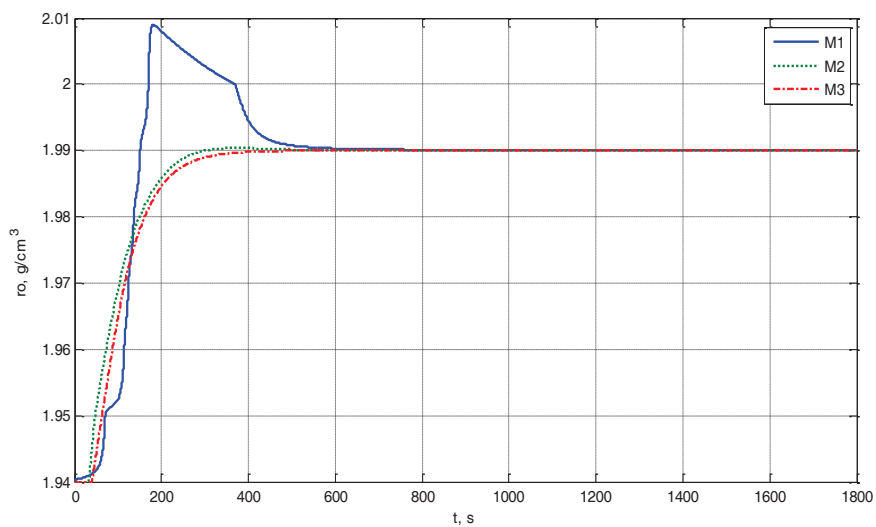
Przeprowadzono badania symulacyjne odpowiedzi układu regulacji na skokową dodatnią i ujemną zmianę wartości gęstości rozdziału. Wyniki przedstawiono na wykresach. Na rys. 7-10. zamieszczono odpowiedzi układu regulacji dla dodatniej zmiany gęstości rozdziału.



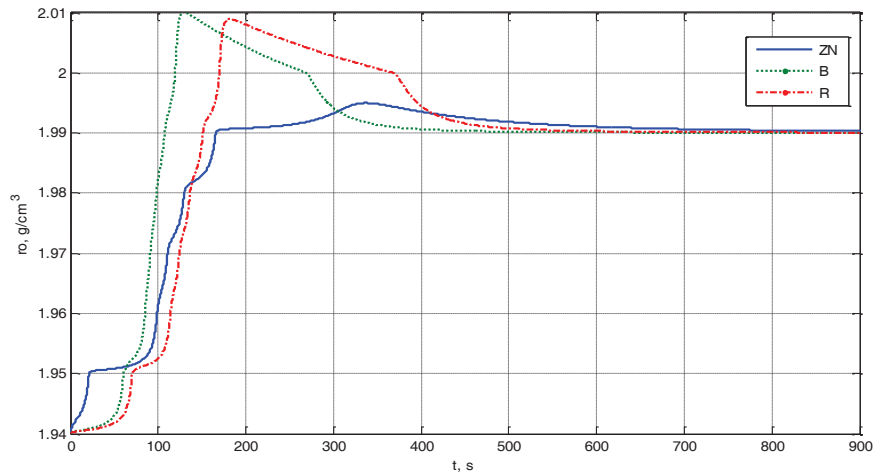
Rys. 7. Odpowiedź układu regulacji, dla rozpatrywanych modeli obiektu z nastawami ZN, na skok jednostkowy gęstości $\Delta\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3$



Rys. 8. Odpowiedź układu regulacji, dla rozpatrywanych modeli obiektu z nastawami B, na skok jednostkowy gęstości $\Delta\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3$

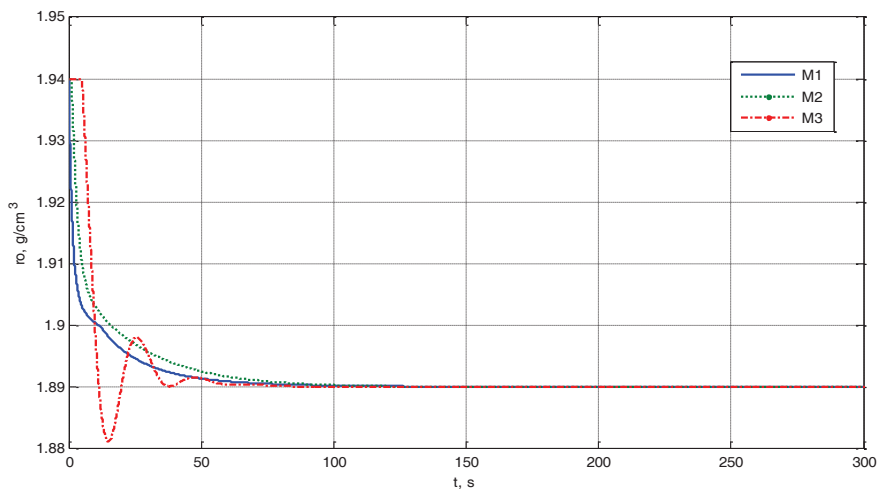


Rys. 9. Odpowiedź układu regulacji, dla rozpatrywanych modeli obiektu z nastawami R, na skok jednostkowy gęstości $\Delta\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3$

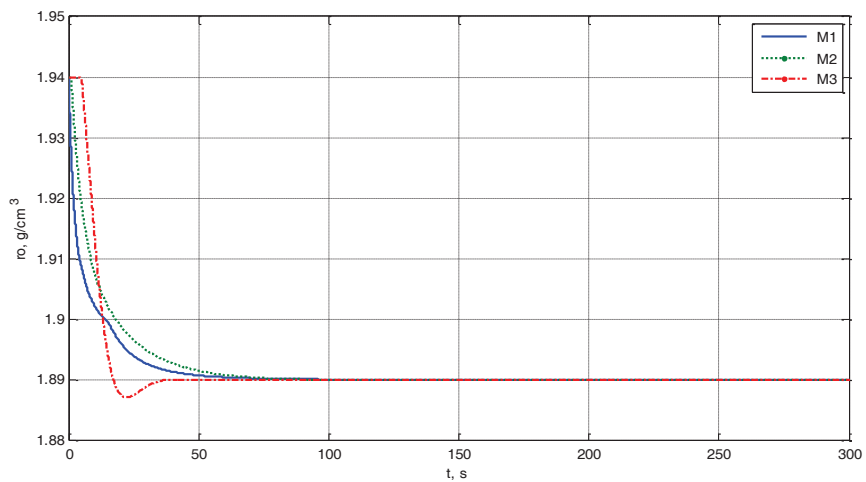


Rys. 10. Odpowiedź układu regulacji z obiektem M1 na skok jednostkowy gęstości $\Delta\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3$

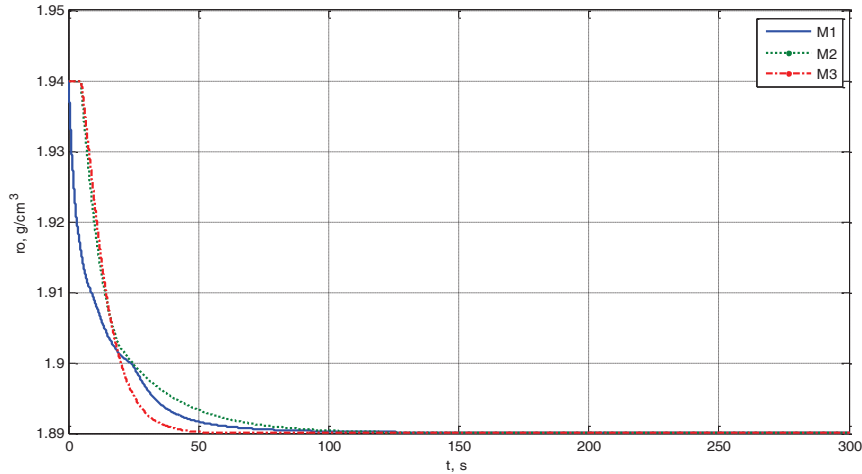
Na rys. 11-14. zamieszczono odpowiedzi układu regulacji dla ujemnej zmiany gęstości rozdziálu.



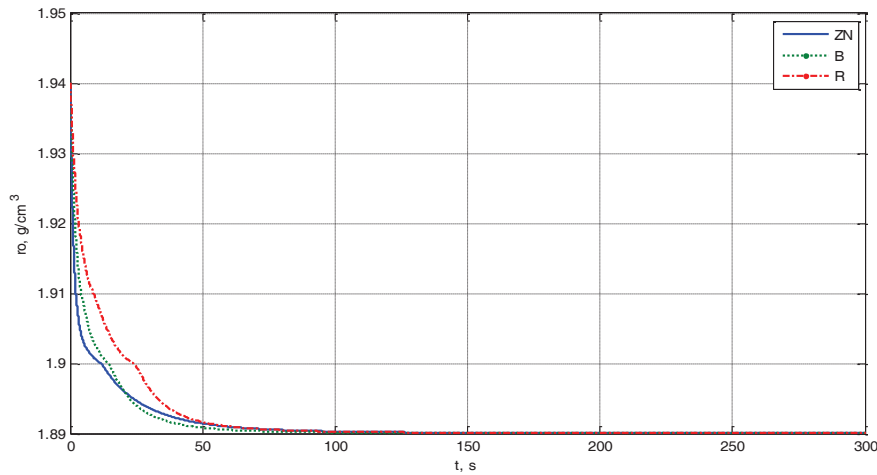
Rys. 11. Odpowiedź układu regulacji, dla rozpatrywanych modeli obiektu z nastawami ZN, na skok jednostkowy gęstości $\Delta\rho = -0,05 \text{ g/cm}^3$



Rys. 12. Odpowiedź układu regulacji, dla rozpatrywanych modeli obiektu z nastawami B, na skok jednostkowy gęstości $\Delta\rho = -0,05 \text{ g/cm}^3$



Rys. 13. Odpowiedź układu regulacji, dla rozpatrywanych modeli obiektu z nastawami R , na skok jednostkowy gęstości $\Delta\rho = -0,05 \text{ g/cm}^3$



Rys. 14. Odpowiedź układu regulacji z obiektem $M1$ na skok jednostkowy gęstości $\Delta\rho = -0,05 \text{ g/cm}^3$

4. WNIOSKI

Na podstawie badań identyfikacyjnych stwierdzono, że charakterystyki dynamiczne strefy odbioru w osadzarce są różne dla dodatnich i ujemnych zmian natężenia przepływu (tab. 1). W celu doboru nastaw regulatora za pomocą metod stosowanych w układach liniowych określono dwa modele zastępcze (zlinearyzowane) charakteryzujące dynamikę układu. Zmiany gęstości rozdziału, wokół punktu pracy, przybliżono modelem inercyjnym pierwszego rzędu z czasem opóźnienia. Dla dodatnich i ujemnych zmian gęstości modele scharakteryzowano różnymi parametrami k , T , τ .

Nastawy regulatorów wyznaczone na podstawie parametrów modelu zlinearyzowanego $M3$ dla ujemnej zmiany gęstości rozdziału dają bardzo zbliżone

wyniki regulacji dla układu z modelem nielinearyzowanym $M1$ (opisującym najdokładniej dynamikę obiektu przemysłowego) i zlinearyzowanym (rys. 11-13). Można zauważyć, że przebiegi przejściowe wielkości regulowanej (gęstości rozdziału) dla modelu nielinearyzowanego charakteryzują się nawet korzystniejszymi właściwościami jakości regulacji. Przy prawie identycznych czasach narastania i ustalania się przebiegów przejściowych dodatkowo w układzie z modelem nielinearyzowanym nie występuje przeregulowanie. Dotyczy to reakcji układu regulacji z wszystkimi rozpatrywanymi nastawami.

Dla dodatniej zmiany gęstości rozdziału ($\Delta\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3$) odpowiedzi układu regulacji także charakteryzują się dużymi podobieństwami (rys. 7-9). Czasy narastania, czasy ustalania oraz stan ustalony przebiegów są zbliżone dla rozpatrywanych modeli dynamiki. Zasadnicza różnica wynika z występowania

większego przeregulowania dla układu z modelem nieliniaryzowanym M1. Należy zauważyć, że nie występują oscylacje wielkości regulowanej.

Różnica w jakości regulacji dla ujemnych i dodatnich zmian gęstości rozdziału wynika z właściwości dynamicznych obiektu rzeczywistego. Dla ujemnych zmian gęstości rozdziału w modelu zastępczym stała czasowa $T = 10$ s jest większa niż opóźnienie $\tau = 5$ s. Dodatkowo opóźnienie jest małe. Reakcja układu na wielkość zmian natężenia odbioru produktu dolnego w układzie nieliniaryzowanym wynosi co najwyżej 10 s. Dla dodatnich zmian gęstości rozdziału w modelu zastępczym stała czasowa $T = 30$ s i jest mniejsza niż opóźnienie $\tau = 40$ s. Reakcja układu, w tym przypadku, na wielkość zmian natężenia przepływu w układzie nieliniaryzowanym wynosi od 10 do 60 s. Jak wiadomo, im mniejsze opóźnienie, tym lepsze właściwości dynamiczne układu. Stąd dla ujemnej skokowej zmiany gęstości rozdziału otrzymano przebiegi przejściowe bez przeregulowania, z krótszymi czasami narastania i ustalania w stosunku do skokowej dodatniej zmiany gęstości rozdziału. Ma to miejsce dla wszystkich rozpatrywanych metod doboru nastaw regulatora.

Porównując wyniki regulacji dla różnych metod doboru nastaw regulatora przy skokowej dodatniej zmianie gęstości rozdziału (rys. 10), można zauważyć pewne różnice. Dla układu regulacji z nastawami według metody B uzyskano najkrótszy czas narasta-

nia i ustalania przebiegu przejściowego, natomiast występuje w nim największe przeregulowanie. Dla układu regulacji według metody ZN czas narastania i czas ustalania przebiegu przejściowego jest największy przy najmniejszym przeregulowaniu. Dla nastaw regulatora według metody R uzyskano wskaźniki regulacji pośrednie.

Przebiegi wielkości regulowanej, dla różnych metod doboru nastaw regulatora, przy skokowej ujemnej zmianie gęstości rozdziału są zbliżone (rys. 14).

Weryfikacja tego sposobu wyznaczania nastaw regulatora powinna być przeprowadzona na obiekcie przemysłowym.

Literatura

1. Cierpisz S.: *Automatyczna regulacja procesu wzbogacania w osadzarkach*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia Nr 403, Gliwice 2012.
2. Kaula R.: *Wybrane metody doboru nastaw regulatora PI w układach regulacji procesów wzbogacania węgla*. W: Materiały konferencyjne XXXIX Konferencji Sekcji Cybernetyki w Górnictwie PAN – ATI 2013, Zakopane 30.09-02.10.2013, Wyd. Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
3. O'Dwyer A.: *Handbook of PI and PID controller tuning rules*, Imperial College Press, London 2003.
4. Ziegler J., Nichols N.: *Optimum settings for automatic controllers*, Trans. ASME, vol. 64, p. 759-768, 1942.
5. PN-88/ M-42000. *Automatyka i pomiary przemysłowe. Terminologia*.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.