



# Analiza efektów wzbogacania węgla kamiennego w osadzarce z wykorzystaniem zmodyfikowanego algorytmu sterowania

Wojciech PIELUCHA<sup>1)</sup>, Joachim PIELOT<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Mgr inż.; Katedra Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska; email: wojciech.pielucha@polsl.pl

<sup>2)</sup> Dr hab. inż.; Katedra Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska; email: joachim.pielot@polsl.pl

<http://doi.org/10.29227/IM-2019-02-14>

Submission date: 12-11-2019 | Review date: 02-12-2019

## Abstract

Przedstawione zostały zagadnienia wzbogacania węgla kamiennego w osadzarkach. Omówiono dwa układy technologiczne: z jedną osadzarką oraz układ z wzbogacaniem wtórnym przy wykorzystaniu dwóch osadzarek o tych samych parametrach. Opisano zjawisko windup, występujące w cyfrowych algorytmach PI oraz przedstawiono negatywne efekty, które ono powoduje. W celu ich ograniczenia, dokonano modyfikacji podstawowego algorytmu poprzez rozbudowanie go o układ kompensacji zjawiska windup. Przeprowadzono następnie badania symulacyjne układu bez modyfikacji oraz zmodyfikowanego algorytmu. Dokonano analizy porównawczej efektów wzbogacania z wykorzystaniem wspomnianych algorytmów dla wybranych układów technologicznych. Jako kryteria oceny przyjęto wartości parametrów dynamicznych procesu wzbogacania oraz wartości parametrów jakościowych produktu wyjściowego.

Słowa kluczowe: osadzarka, cyfrowy regulator PI, zjawisko windup

## Wstęp

W wyniku wzbogacania węgla otrzymuje się różną ilość i jakość produktów, zależne od składu ziarnowego i charakterystyki wzbogalności nadawy, zastosowanych operacji przerobczych w układzie technologicznym, ich parametrów rozdziału oraz niedokładności wzbogacania. Niedokładność ta jest spowodowana faktem, iż rzeczywisty przebieg procesów wzbogacania różni się od idealnego, teoretycznego modelu danej operacji, co prowadzi do nieidealnego kształtu krzywych rozdziału [7, 15]. Na kształt krzywych wpływ ma w dużej mierze skład ziarnowy nadawy. Im mniejsze ziarna, tym bardziej odbiega on od kształtu idealnego. Ma on bezpośredni wpływ na efekty wzbogacania – ilość i jakość koncentratu.

Niniejszy artykuł dotyczy wpływu własności dynamicznych osadzarek na efekty wzbogacania. Porównane zostały efekty wzbogacania w wybranych układach technologicznych – jednej osadzarki oraz dwóch osadzarek z wzbogacaniem wtórnym. Na podstawie badań symulacyjnych wyznaczono zarówno wpływ zastosowanych algorytmów regulacji na dynamikę procesów wzbogacania oraz na wartość wybranego parametru jakościowego koncentratu, którym jest zawartość popiołu. Obliczono także wartość całki z kwadratu błędów regulacji dla każdego przypadku. Zostały też wyznaczone parametry dynamiczne procesu regulacji – czas narastania oraz czas regulacji wielkości sterowanej.

## Rozpatrywane układy technologiczne

W pracy [1] przedstawiono wpływ zmian składu ziarnowego na efekty wzbogacania w dwóch układach wzbogacania w jednej osadzarce oraz wzbogacania posobnego w dwóch takich samych urządzeniach. Przedstawione analizy dotyczyły

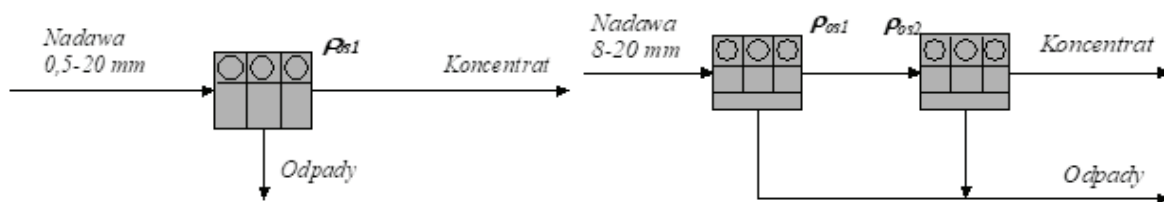
stanów statycznych, z pominięciem stanów przejściowych podczas zmian sterowań w układzie. W niniejszym artykule zaprezentowany został wpływ zmian składu ziarnowego na wybrane wskaźniki jakości sterowania z regulatorem PI.

Na rys. 1. przedstawione są dwa układy technologiczne, których dotyczą prognozy wzbogacania. Rozpatrywany układ z jedną osadzarką (1 os.) potraktowano jako układ odniesienia (podobnie jak w [1, 10, 15]); drugim jest układ wzbogacania posobnego w dwóch osadzarkach o tych samych parametrach (2 os.).

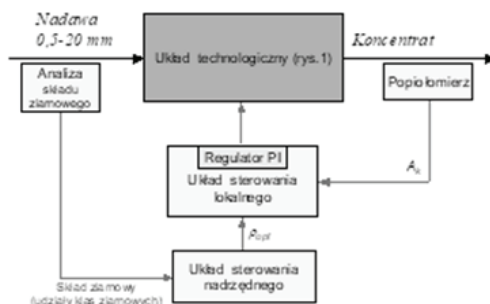
Obecnie jakość koncentratu określa się poprzez pomiar zawartości popiołu, którego wynik można wykorzystać do korekty gęstości. Jako gęstość rozdziału rozumie się gęstość frakcji wzbogacanego węgla, która przechodzi w połowie do koncentratu i w połowie do odpadów.

W przypadku wzbogacania w osadzarkach pojęcie gęstości rozdziału to pojęcie teoretyczne, ponieważ parametr wpływający na wartość gęstości rozdziału (czyli gęstości warstwy znajdującej się na wysokości proggu przelewowego) to natężenie odbioru produktu dolnego [2]. Należy więc w tym przypadku wyznaczyć gęstość warstwy rozdziału produktów wzbogacania [4]. W praktyce położenie warstwy materiału o żądanej gęstości określa się za pomocą pływaka, który stanowi czujnik w układzie regulacji odbioru produktu dolnego. W najnowszych układach sterowania pracy osadzarek stosowany jest również gęstościomierz izotopowy zainstalowany w strefie odbioru produktów wzbogacania, służący do korekty błędów pomiarowych pływaka [2].

Na rys. 2. przedstawiono schemat blokowy układu regulacji wybranych układów technologicznych. Z układu analizy wizyjnej uzyskiwana jest informacja o aktualnym składzie ziarnowym nadawy [8, 9]. Układ sterowania nadrzędnego do-



Rys. 1. Rozpatrywane układy technologiczne  
Fig. 1. Considered processes



Rys. 2. Schemat blokowy układu regulacji  
Fig. 2. Block diagram of the control system

biera następnie optymalną gęstość rozdziału  $\rho_{opt}$ , zależną od składu ziarnowego dla zadanej zawartości popiołu w koncentracie. Równocześnie na podstawie pomiaru zawartości popiołu w koncentracie ( $A_k$ ), układ sterowania dokonuje zmian natężenia przepływu produktu dolnego, skutkujących zmianą wartości gęstości rozdziału w osadzarce. W układach wzbogacania posobnego w dwóch wzbogacalnikach optymalne gęstości rozdziału w poszczególnych wzbogacalnikach są identyczne, dzięki czemu kształt krzywych rozdziału najbardziej przypomina idealny, co powoduje zminimalizowanie niedokładności wzbogacania [15].

Do obliczeń symulacyjnych przyjęto zostały charakterystyki węgla trudno wzbogacalnego. W tabeli 1 podano charakterystykę składu ziarnowego, w tabeli 2 natomiast – charakterystykę wzbogacalności, która jest taka sama dla wszystkich klas ziarnowych.

W badaniach symulacyjnych wykorzystano pozycyjny algorytm cyfrowego regulatora PI. Opis matematyczny rozpatrywanego algorytmu ma postać:

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

gdzie:

- $u(n)$  – sygnał sterujący,
- $e(n)$  – błąd regulacji,
- $k_p$  – wzmacnienie regulatora,
- $T_i$  – czas całkowania,
- $T_s$  – okres próbkowania.

Tak opisany algorytm wyposażono następnie w układ ograniczający narastanie sygnału całkowującego regulatora, które to zjawisko nazywa się w literaturze zjawiskiem wind-up. Polega ono na zwiększeniu wartości sygnału, będącego wynikiem całkowania błędu regulacji, powyżej ograniczeń sygnału wyjściowego. Prowadzi to do wydłużenia powrotu sygnału do zakresu określanego przez te ograniczenia, co powoduje pogorszenie jakości sterowania – znacząco

zwiększa się przeregulowanie oraz czas regulacji. Działanie układu anti-windup polega na zatrzymaniu całkowania na czas, w którym wartość sygnału wzrasta powyżej górnego lub maleje poniżej dolnego ograniczenia. W takim przypadku na zmiany wielkości wyjściowej regulatora wpływa wyłącznie działanie członu proporcjonalnego. Przyjęto nastawy regulatora  $k_p = 270$ ,  $T_i = 15$  [s] oraz okres próbkowania  $T_s = 0,1$  [s].

Model symulacyjny osadzarki został wykonany na podstawie równań opisujących warstwowo model strefy odbioru, opisany w [2], który można przedstawić za pomocą ogólnymi wzorami:

$$h_i(t) = H + \Delta h_i(t) \quad (2)$$

$$\Delta h_i(t) = \frac{v_i}{v_s} \cdot [\Delta h_{i(v=v_s)}(t) - \Delta h_{i-1(v=v_s)}(t)] \quad (3)$$

$$\Delta h_{i(v=v_s)}(t) = \frac{1}{A} \cdot \int_0^t \left\{ \sum_{i=1}^n q_i \right\} - (q_d + q_g) \cdot dt - H \quad (4)$$

gdzie:

- $q_i$  – natężenie przepływu „i”-tej warstwy [ $m^3/s$ ],
- $q_d$  – natężenie przepływu produktu dolnego [ $m^3/s$ ],
- $q_g$  – natężenie przepływu produktu górnego [ $m^3/s$ ],
- $A$  – powierzchnia strefy odbioru [ $m^2$ ],
- $h_{i0}$  – początkowe położenie warstwy [m],
- $v_s$  – średnia prędkość nadawy [m/s],
- $b$  – szerokość łoża osadzarki [m],
- $v_i$  – prędkość ruchu „i”-tej warstwy [m/s],
- $H$  – wysokość proggu przelewowego [m].

Ponadto w modelu tym uwzględniono opóźnienie transportowe  $\tau$  równe 15 s.

### Przebieg i wyniki badań symulacyjnych

Na potrzeby badań symulacyjnych założono, że nadawa składa się z dwóch różnych nadaw – trudno i łatwo wzbogacalnej (tab. 3). Przyjęto, że ich udział w węglu surowym zmienia się tak, jak podano w tab. 4.

Tab. 1. Charakterystyka składu ziarnowego nadawy  
 Tab. 1. Characteristics of grain composition of the feed

Numer klasy	Wymiary ziarn mm	Udziały klas ziarnowych nadawy %
1	0,5 – 1	35
2	2 – 5	30
3	8 – 20	35

Tab. 2. Charakterystyka wzbogacalności nadawy (0,5–20 mm)  
 Tab. 2. Characteristics of feed enrichment (0.5–20 mm)

Gęstość frakcji g/cm <sup>3</sup>	Wychód frakcji %	Zawartość popiołu %	Zawartość siarki całkowitej %	Wartość opalowa 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	19 960

Tab. 3. Charakterystyka składu ziarnowego nadaw N1 oraz N2  
 Tab. 3. Characteristics of grain composition of N1 and N2 feeds

Numer klasy	Wymiary ziarn mm	Udziały klas ziarnowych, %	
		N1	N2
1	0,5 – 1	0	70
2	2 – 5	30	30
3	8 – 20	70	0

Tab. 4. Zmiany składu ziarnowego nadawy  
 Tab. 4. Changes in the grain composition of the feed

Lp.	Udziały nadaw	
	N1	N2
1.	50%→100%	50%→0%
2.	100%→50%	50%→100%

Tab. 5. Wymagane zmiany gęstości rozdziału w układzie z jedną osadzarką  
 Tab. 5. Required changes in the density of the separation in one jig system

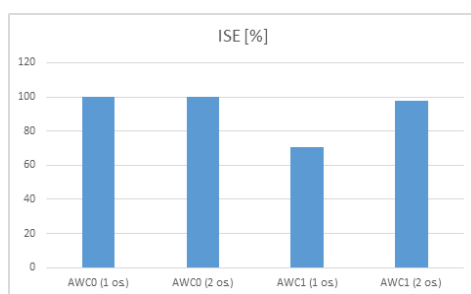
Zmiana składu ziarnowego	$\rho_{os1}$ g/cm <sup>3</sup>
1.	1,541→1,710
2.	1,710→1,541

Tab. 6. Wymagane zmiany gęstości rozdziału w układzie z dwiema osadzarkami  
 Tab. 6. Required changes in the separation density of the system with two jigs

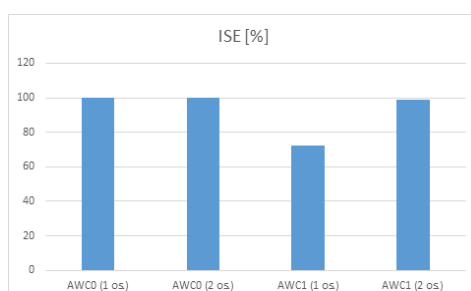
Zmiana składu ziarnowego	$\rho_{os1}$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{os2}$ g/cm <sup>3</sup>
1.	1,700→1,779	1,700→1,779
2.	1,779→1,700	1,779→1,700

Tab. 7. Wyniki badań symulacyjnych dla rozpatrywanych przypadków  
 Tab. 7. Results of simulation tests for the cases considered

Układ technologiczny	Okres zmian składu ziarnowego, min.	AWC	Czas narastania, s	Czas regulacji, s	Przeregulowanie, %	ISE, %	A <sub>Kir</sub> , %
1 os.	5	AWC0	46	130	11	100	13,12
2 os.	5	AWC0	60	160	6	100	13,05
1 os.	5	AWC1	47	112	5	70,45	13,10
2 os.	5	AWC1	61	155	4	98	13,04
1 os.	10	AWC0	47	132	11	100	13,04
2 os.	10	AWC0	62	160	6	100	13,02
1 os.	10	AWC1	48	112	5	72	13,02
2 os.	10	AWC1	61	155	4	99	13,01



Rys. 3. Wartości ISE dla okresu zmian 5 minut  
Fig. 3. ISE values for the change period of 5 minutes



Rys. 4. Wartości ISE dla okresu zmian 10 minut  
Fig. 4. ISE values for the change period of 10 minutes

Zmiany składu ziarnowego nadawy powodują, przy stałej zadanej zawartości popiołu  $A_k = 13$  [%], zmianę zadanej gęstości rozdziału dla układu z jedną (tab. 5) i dwiema osadzarkami (tab. 6).

W symulacji założono zmiany składu ziarnowego w okresie 5 oraz 10 minut. Przeprowadzono badania dla układu regulacji bez kompensacji zjawiska windup (AWC0) oraz z zastosowaniem zatrzymania całkowania w przypadku przekroczenia ograniczeń (AWC1).

Na podstawie otrzymanych przebiegów wyznaczone zostały wskaźniki jakości regulacji, które opisuje norma [17]:

- czas regulacji,
- czas narastania,
- całkę z kwadratu błędu regulacji (ISE).

Wartości wskaźników oraz średnią zawartość popiołu zestawiono w tab. 7. Wartości całki z kwadratu błędu w ujęciu względnym dla okresu zmian składu ziarnowego wynoszącego 5 minut ilustruje rys. 3, a dla 10 minut – rys. 4.

## Podsumowanie

Na podstawie badań symulacyjnych można wysnuć następujące wnioski:

Zastosowanie układu ze wzbogacaniem posobnym w dwóch osadzarkach pozwala na nieznaczne zmniejszenie średniej zawartości popiołu w koncentracie w porównaniu z zastosowaniem tylko jednej osadzarki

Układ AWC1 powoduje ograniczenie przeregulowania oraz zmniejszenie średniej zawartości popiołu w koncentracie przede wszystkim w układzie z jedną osadzarką

W układzie ze wzbogacaniem posobnym zmiany gęstości rozdziału są niewielkie w porównaniu z układem wykorzystującym jedną osadzarkę, wskutek czego zjawisko windup nie występuje

Zastosowanie układu z dwiema osadzarkami powoduje wzrost wartości czasu regulacji oraz czasu narastania; wynika to z faktu, iż każdy ze wzbogacalników w takim układzie charakteryzuje pewna stała czasowa oraz opóźnienie transportowe, mające znaczny wpływ na wspomniane wskaźniki.

## Literatura – References

1. Boron S., Heyduk A., Pielot J.: Application of on-line visual analysis of feed particle size distribution to the multiple coal enrichment systems – evaluation of economic efficiency. Materiały XIX Międzynarodowej Konferencji Przeróbki Kopalni (Mineral Engineering Conference MEC 2014), Istebna, 15-18 września 2014.
2. Cierpisz S.: Automatyczna regulacja procesu wzbogacania węgla w osadzarkach. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
3. Cierpisz S.: Parametry jakości węgla – pomiary i sterowanie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
4. Cierpisz S.: Maksymalizacja produkcji w układach sterowania procesami grawitacyjnego wzbogacania węgla. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej EMTECH 2016: Zasilanie, telemetria i automatyka w przemyśle wydobywczym „Innowacyjność i bezpieczeństwo, Katowice 7-8 kwietnia 2016r, str. 206-212.
5. Cierpisz S., Kaula R.: Dobór parametrów regulatora dla obiektu inercyjnego z opóźnieniem na przykładzie osadzarki pulsacyjnej. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 3 (517), Katowice 2014, str. 5-13.
6. Głowiak S.: Wpływ składu ziarnowego nadawy na skuteczność wzbogacania w osadzarce. Materiały XV Konferencji Automatyzacji Procesów Przeróbki Kopalni, Szczyrk, 2-4 czerwca 2009, str. 37-50.
7. Goodman F., McCreery J.: Coal Preparation Computer Model. v.I. U.S. Environmental Protection Agency, Washington 1980.
8. Heyduk A.: Topograficzna analiza dwuwymiarowych obrazów materiału ziarnistego. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2 (456), Katowice 2009, str. 5-10.
9. Heyduk A.: Teksturowe (niesegmentacyjne) metody wizyjnej oceny składu ziarnowego. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 3 (469), Katowice 2010, str. 16-24.
10. Heyduk A., Pielot J.: Economical Efficiency Assessment of an Application of On-line Feed Particle Size Analysis to the Coal Cleaning System in Jigs. “Inżynieria Mineralna” (“Journal of the Polish Mineral Engineering Society”), Nr 2 (34) 2014, str. 217-228.
11. Kaula R.: Dobór nastaw regulatora PI w układach regulacji procesów wzbogacania węgla. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi”, Volume 31 nr 1, Kraków 2015, str. 141-154.
12. Kaula R., Pielucha W.: Układ regulacji procesu produkcji mieszanek węgla z regulatorem cyfrowym – studium przypadku. III Polski Kongres Górniczy „Górnictwo wczoraj – dziś – jutro”. Wrocław 2015.
13. Pielot J.: An analysis of effects of coal jigging after changes in the grain composition of a feed. “Archives of Mining Sciences”, 55 (4, 2010), Kraków 2010, s. 827-846.
14. Pielot J.: Wpływ zmian składu ziarnowego nadawy na efekty wzbogacania węgla w układach osadzarek. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 10 (488), Katowice 2011, str. 32-39.
15. Pielot J.: Wielokryterialna optymalizacja produkcji układów technologicznych grup wzbogacalników grawitacyjnych (Multi-criteria method of production optimization in technological systems of gravitational separators groups). Monografia nr 306, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
16. Pielot J.: Wybrane zagadnienia hierarchicznego sterowania i zarządzania w zakładzie przeróbki węgla – cz.I. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 3 (517), Katowice 2014, str. 37-44.
17. PN-88/ M-42000: Automatyka i pomiary przemysłowe. Terminologia.
18. Tatjewski P.: Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.
19. Trybalski K.: Analiza właściwości dynamicznych procesów i układów technologicznych przeróbki surowców mineralnych. Rozprawy Monografie nr 83, UW AGH, Kraków 1999.

### *Analysis of Hard Coal Enrichment Effects in Jig Using Modified Control Algorithm*

*The issues of hard coal enrichment in jigs were introduced. Two technological systems were discussed: one with a set-up and a secondary enrichment system with the use of two jiggling units with the same parameters. The windup phenomenon, occurring in digital PI algorithms and its negative effects were described. In order to limit them, a basic algorithm was modified by extending it to the windup compensation system. Then, simulation testing of the system without modification and modified algorithm was performed. A comparative analysis of the enrichment effects was performed using these algorithms for selected technological systems. Values of the dynamic parameters of the enrichment process and values of the quality parameters of the output product were used as the evaluation criteria.*

*Keywords: jig, digital PI controller, windup phenomenon*