

## Analysis of effects of coal enrichment in jigs at changing grain composition of the feed

*One of the basic coal preparation processes is coal preparation in water pulsating jigs. The efficiency of coal preparation depends on the washability of the raw coal feed and the shape of partition curves which, in turn, depend on the grain composition of the feed. Thus, when the grain composition changes, it is necessary to change the partition density of the jig (by changing the reception intensity of the undersized product) [2, 6]. The authors of the article attempted to estimate, tentatively, how an on-line analysis of the feed grain composition, in technological configurations with one or two jigs that successively prepare the concentrates, can improve the preparation efficiency with respect to the dynamic properties of the jig. The jig is an inertial object with time delay – transport delay. However, preparation processes of minerals have a non-linear character [4, 12] – equivalent parameters of the object are different for positive and negative changes in the set value. Dynamic effects of preparation were presented with respect to changes in the grain composition.*

Keywords: coal enrichment in jigs, grain composition of coal, on-line control, control dynamics.

### 1. INTRODUCTION

---

A coal preparation process results in different volumes and quality of products, depending on the grain composition and washability of raw coal, type of preparation operations in the coal preparation technological configuration, partition parameters of these operations, and the degree of the preparation inaccuracy. The inaccuracy of preparation is caused by a non-ideal quality of the process which results in a non-ideal shape of partition curves [7, 15] used for modelling preparation processes in gravity concentrators. The shape of the partition curves is influenced by the size of grains in jigs – the smaller are the grains, the worse is the shape of the curves as it differs more from the ideal shape. This situation results in higher inaccuracy of the enrichment process. The shape of partition curves has a direct impact on the volume and quality of concentrates.

The article is a continuation of the work [1] and, simultaneously, preliminary research on the impact of dynamic properties of jigs on preparation effects in the conditions of the changing grain composition of the feed. Dynamic effects of preparation were compared. In

addition, the reaction of the preparation system was assessed with respect to control changes in the case of simulated changes of the grain composition of raw coal. Further, more diverse cases of the grain composition changes in different technological configurations will be taken into account. The objective of the works undertaken by the Department of Electrical Engineering and Control in Mining is visual on-line identification of changes in the grain composition [8, 9]. This way it will be possible to force partition density changes in direct control systems (with the use of optimization layers, supervisory control [16] and adaptive regulation algorithms. The changes will be forced in such a way that the quality of the concentrate will be stabilized, which should result in a higher production value.

### 2. ANALYZED TECHNOLOGICAL CONFIGURATIONS

---

The work [10] features the influence of grain composition changes on enrichment effects in a single jig and in parallel enrichment configurations of two and

three jigs. While [1] presents the effects in two configurations of successive enrichment in two and three jigs, in which temporary concentrates are prepared again, as well as in a configuration with the temporary product recirculation. The presented analyses referred to static states only and did not take into account temporary states during control changes in the configuration. Here the authors presented the impact of grain composition changes on selected

control quality indicators at the PI controller settings selected by means of two methods.

Figure 1 features two technological configurations to which preparation and control prognoses refer. The considered configuration with one jig (1 os.) is treated as a reference configuration (similarly to [1, 10, 15]); the second configuration is a configuration for successive preparation in two jigs (2 os.).

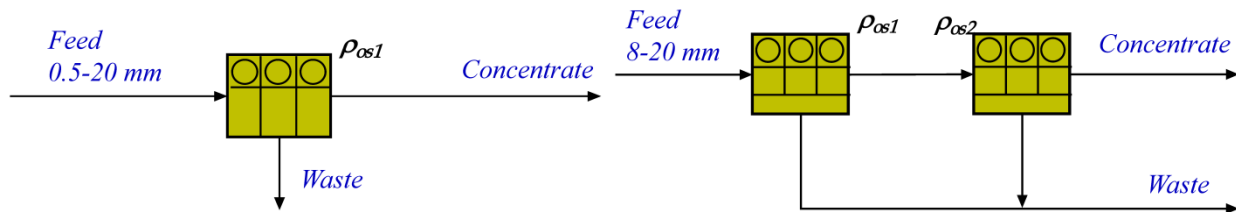


Fig. 1 Analyzed preparation configurations

Nowadays the concentrate quality is determined by on-line measurement of ash content and the result of this measurement is used to correct the partition density – this is the basic method to stabilize the concentrate quality. Partition density is understood as the fraction density of the enriched coal, passing one half to the concentrate and the other half to the waste.

As for the enrichment process in jigs, the term of partition density is a theoretical one. The basic parameter which impacts the partition density in a jig is the flow efficiency of the undersized product [3]. Instead of the partition density it is necessary to determine the density of the partition layer of enriched products [4]. In practical applications the position of the layer of the set-density material is determined by means of a float which is a sensor in the control system of the undersized product reception. In the latest systems for controlling jigs operations an isotope density meter is installed in the enriched-products reception zone. The meter is used to correct measurement errors of the float when the jig operations are unstable [3]. Still, due to the character of this paper whose objective is to present potential effects of control with the use of the on-line analysis of grain composition, it is justifiable to use the theoretical term of partition density<sup>1</sup>.

Figure 2 features a block diagram with a control system of one jig or two jigs that successively enrich the concentrates. The visual analysis system provides information about the current grain composition of the feed [8, 9]. In the supervisory control system the optimal partition density  $\rho_{opt}$  (dependent

on the grain composition) is selected for the set ash content in the concentrate. At the same time, based on the measurement of ash content in the concentrate  $A_k$ , the controller changes the flow efficiency of the undersized product. This operation results in a changed value of the partition density in one jig or two jigs. It is important to note that in successive enrichment systems of two (or three) concentrators the optimal partition density values in particular concentrators are always identical. Thanks to this, the enrichment inaccuracy takes its minimal value, while the shape of partition curves is as close to the ideal one as possible [15].

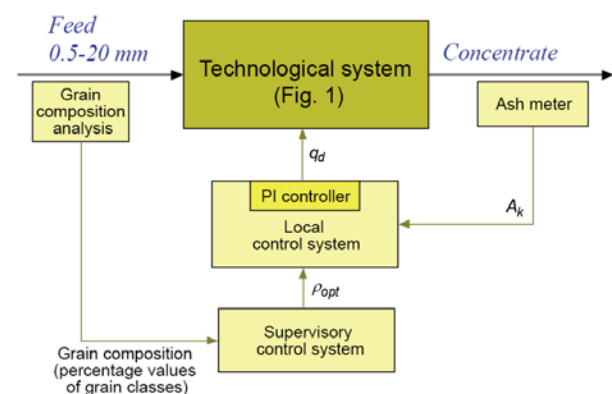


Fig. 2. Block diagram of a control system for one of two jigs (as in Fig. 1)

Taking into consideration the on-line analysis of a feed grain composition would cause a much faster reaction of a control systems, even few minutes faster when compared to the basic way – only with the usage of an ashmeter. As an effect of faster control changes the final concentrates quality parameters

<sup>1</sup> In the case of possible practical applications with the use of the analysis system of grain composition, the partition density will be replaced by the partition layer density of enriched products or some research will be conducted about the correlation between these quantities.

should become more stable, what should influence the increase of the product value.

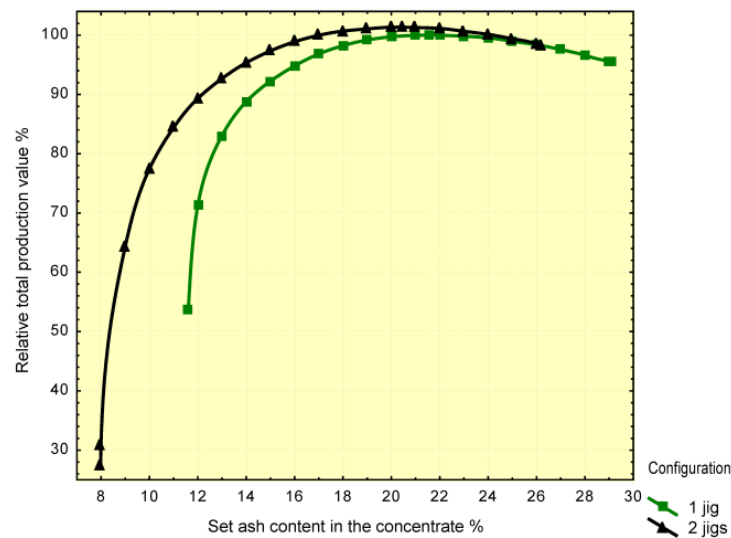
The characteristics of low- washability raw coal were adopted for simulation calculations. Table 1 features the characteristics of the grain composition, while Table 2 – washability characteristics, i.e. density- and quality-based washability, the same for all grain classes.

**Table 1**  
**Characteristics of feed grain composition of raw coal**

Class number	Grain sizes mm	Percentage values of feed grain classes %
1	0.5 – 1	35
2	2 – 5	30
3	8 – 20	35

**Density and quality characteristics of the feed (0.5-20 mm)**

Fraction density g/cm <sup>3</sup>	Fraction yield %	Ash content %	Total sulphur content %	Calorific value 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



*Fig. 3. Relative maximal value of the final concentrate production for the whole achievable range of ash content*

### 3. COMPARATIVE ANALYSIS OF ENRICHMENT EFFECTS

For the purpose of a jig coal enrichment effects forecasting, different models of separation curves (identified for different grain classes) were used [7]. Figure 3 presents maximal, achievable production

values in the conditions of a stable grain composition of the feed, at different set qualities of concentrates [1, 15]. In optimization calculations the production maximization algorithm of the set quality was applied [15]. The configuration with one jig is a reference configuration, therefore the maximal production value that can be achieved in this configuration has the relative value of 100% assigned.

### 3.1. Changes in grain composition of raw coal

The washability, grain composition and flow efficiency of raw coal are variable parameters. If the feed, which is to be delivered to the coal preparation plant, is in the buffer container, the flow intensity is stabilized and quality parameters are somehow averaged. The article gives the prognoses how the changes impact only the grain composition, at the assumption that washability and constant intensity characteristics are unchanged [13, 14]. It was assumed that the changes in the grain composition are based on changes in the shares of particular grain classes in raw coal. For this reason, the feed was divided into two feeds, N1 and N2, with different grain compositions (Table 3) but the same washability characteristics (Table 2).

**Table 3**  
**Characteristics of grain composition of N1 and N2 feeds**

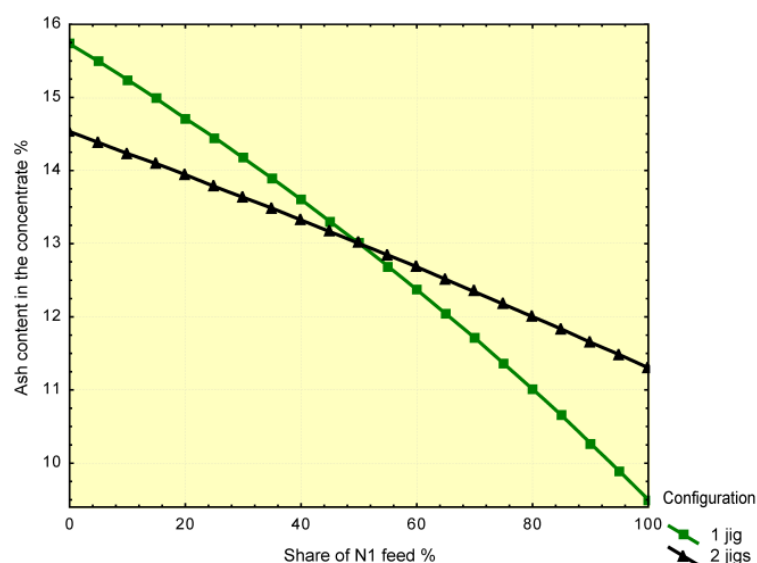
Class number	Grain sizes mm	Percentage values of the feed grain classes %	
		N1	N2
1	0.5 – 1	0	70
2	2 – 5	30	30
3	8 – 20	70	0

In order to examine the impact of the grain composition changes it was assumed that the feed consists of two feeds, N1 and N2 (Table 3). These two feeds are always mixed in such proportions that their total share is equal to 100% [1, 15]. The increase in the N1 share from 0% to 100% results in simultaneously

decreasing share of N2 from 100% to 0%. If the shares of both feeds are 50%, the shares of all three grain composition classes are approximately the same – such as in Table 1. This case reflects the initial situation and is treated as enrichment with undisturbed grain composition. As the washability characteristics are the same for all grain composition classes (Table 2), the changes of N1 and N2 shares result in changes of the grain composition only, not in the washability curves [1].

The results of all above mentioned simulation prognoses were achieved at a constant total weight of both feeds but at changing volumes of shares of N1 and N2. The increase in the N1 share (with the simultaneous decrease of the N2 share) results in a larger volume of the biggest, more thoroughly prepared grains (class 3) and, at the same time, a smaller volume of the finest grains (class 1) which are prepared with less accuracy. The share of medium-size grains (class 2) remained unchanged in all cases. With the increasing share of N1 and the decreasing one of N2, it is possible to observe improvement in the grain composition of the feed, meaning that the enrichment accuracy is better. Further in the article, the changes of the grain composition should be understood as the changes of mutual shares of the N1 and N2 feeds [1].

Figure 4 illustrates the impact of the N1 and N2 feeds shares on the ash content in the concentrate at unchanged, optimum partition densities adopted for equal shares of N1 and N2 (with no disturbances in the grain composition), at the set ash content in the concentrate equal to 13%. The changes in the N1 share within the range 0÷100% result in simultaneous changes of the N2 share in the range 100÷0%.



*Fig. 4. Ash content in the concentrate according to configurations from Fig. 1, at different proportions of N1 and N2 feeds;  $A_{zad} = 13\%$*

### 3.2. Comparison of dynamic effects of preparation at changes of grain composition

In technological systems for hard coal preparation the quality of the concentrate is determined by means of on-line measurements of ash content in the concentrate. As the enrichment process conducted in a jig is sensitive to changes in the raw coal grain composition (Fig. 4), it is recommended to have a quick reaction of jig operations control systems to these changes. Certainly, the result of ash content measurement in the concentrate is a reliable information to work out the partition density changes. However, the information is delayed by a few minutes due to the transport time of the prepared material in jigs and on screens. Therefore, the use of the on-line analysis of the feed to be prepared enables the control systems to react a few minutes more quickly, to the changes in the grain composition. The increasing production values determined in the works [1, 10] refer to the comparison of the production value in the systems without the grain composition analysis with those that employ on-line analysis of the grain composition. These results were achieved for static states, with respect to the transport time of prepared coal in one jig (2 min), but excluding the inertia of the jigs and control systems.

In order to make a comparative analysis of dynamic effects of enrichment, a jig model was adopted as an inertial object with time delay, described in [2, 19]. The object parameters for positive (increasing share of the N1 feed) and negative (decreasing share of the N2 feed) changes of the input signal were selected on the basis of the work [5]. The comparison concerned the effects of control systems operation in technological configurations with one or two jigs.

The adopted control algorithm was the increasing PI controller, described by the following formulas:

$$u[n] = u[n-1] + \Delta u[n] \quad (1) \text{ Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.}$$

$$\Delta u[n] = k_p \left\{ e[n] - e[n-1] + \frac{T_s}{T_i} e[n] \right\} \quad (2) \text{ Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.}$$

where:

$u$  – control signal,

$e$  – control error,

$k_p$  – controller gain,

$T_s$  – sampling period,  $T_s = 1$  s

$T_i$  – controller integration time.

In both technological configurations the authors adopted the grain composition changes expressed as percentage shares of two feeds, N1 and N2, with different grain compositions – presented in Table 4.

The reaction to the changes in the feed grain composition should come from control systems (optimization layers, supervisory control and direct control

[16, 18]) and, as a result of that, these systems should enforce proper changes in the partition density.

**Table 4**  
**Changes in the feed grain composition**

No	Feed shares	
	N1	N2
1.	50%→75%	50%→25%
2.	50%→100%	50%→0%
3.	25%→50%	75%→50%
4.	100%→50%	50%→100%
5.	75%→50%	25%→50%
6.	50%→25%	50%→75%

It was assumed that ash content in concentrates from both technological configurations  $A_k = 13\%$ . Using the production maximization algorithm of the set quality [15], optimal partition densities in the jigs were determined, at different shares of the N1 and N2 feeds. The changes in partition density, necessary to re-achieve the set ash content in concentrates (13%), are presented in Table 5 (for the configuration with one jig) and in Table 6 (for the configuration with two jigs).

**Table 5**  
**Required changes in partition density in a one-jig configuration**

Change of grain composition (like in Table 4)	$\rho_{os1}$ g/cm <sup>3</sup>
1.	1.541→1.630
2.	1.541→1.710
3.	1.425→1.541
4.	1.710→1.541
5.	1.630→1.541
6.	1.541→1.425

**Table 6**  
**Required changes in partition density in a two-jig configuration**

Change of grain composition (like in Table 4)	$\rho_{os1}$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{os2}$ g/cm <sup>3</sup>
1.	1.701→1.739	1.700→1.739
2.	1.701→1.779	1.700→1.779
3.	1.664→1.701	1.663→1.700
4.	1.779→1.701	1.779→1.700
5.	1.739→1.701	1.739→1.700
6.	1.701→1.664	1.700→1.663

For the given partition density changes, the controller settings were adopted according to two methods:

- direct method with the condition of the phase margin, described in [11];

B. modified method, in which the gain of the controller is bigger by a half and simulations are re-calculated for the same changes in the grain composition.

Based on the achieved flows, the control quality indicators were determined, described in the standard [17]:

- setting (control) time;
- rise time
- integral square error (ISE).

Table 7 features the values of the controller settings and the three above mentioned control quality indica-

tors in both analyzed configurations, with the use of the A and B methods. The reference value (100%) corresponds to the integral square error (ISE) for the case when the share of the N1 feed increases from 50% to 100% in the configuration with one jig.

Figures 5 and 6 present relative values of the integral square error for a change in the grain composition. Figure 3 illustrates the values for N1 changing from 50% to 100%, while Figure 6 – for the same feed changing from 100% to 50%.

**Table 7**

**Settings and control quality indicators for the considered configurations**

Change of grain composition (like in Table 4)	Configuration	$k_p$	$T_i$ s	Control time s	Rise time s	ISE %
Settings adopted according to the adoption method A						
1.	1 jig	195	30	194	70	117
1.	2 jigs	195	30	380	140	43
2.	1 jig	195	30	200	71	100
2.	2 jigs	195	30	388	140	43
3.	1 jig	195	30	196	71	199
3.	2 jigs	195	30	384	140	43
4.	1 jig	208	10	26	8	85
4.	2 jigs	208	10	52	16	36
5.	1 jig	208	10	25	7	99
5.	2 jigs	208	10	52	16	36
6.	1 jig	208	10	26	8	167
6.	2 jigs	208	10	52	16	36
Modified settings –method B						
1.	1 jig	292,5	30	230	32	96
1.	2 jigs	292,5	30	376	82	35
2.	1 jig	292,5	30	247	47	75
2.	2 jigs	292,5	30	374	82	35
3.	1 jig	292,5	30	235	34	96
3.	2 jigs	292,5	30	374	82	35
4.	1 jig	312	10	42	4	82
4.	2 jigs	312	10	48	10	35
5.	1 jig	312	10	43	5	96
5.	2 jigs	312	10	48	12	35
6.	1 jig	312	10	42	5	163
6.	2 jigs	312	10	48	10	35

#### 4. CONCLUSIONS

Based on the conducted simulation analyses it can be concluded that:

- better enrichment effects are achieved with the configuration of two jigs which prepare the material successively;

- control time indicators in the configuration with two jigs have higher values than in the case with one jig; this is caused by the use of two machines with similar parameters, resulting in longer time of the preparation process;
- the value of the integral square error for the changes in the set density partition is significantly lower for two jigs than for one jig;

- the described modification of the controller settings (method B) causes slight increase of control time but, at the same time, shorter rise time; the value of the integral square error decreases significantly only in case of positive changes in the set partition density;
- the presented results allow to undertake work on determining how the changes in the feed grain composition impact the dynamic parameters of a jig and a set of jigs as control objects; at the same time, they allow to start working on the preparation of an adaptive algorithm for pulsating jigs control.

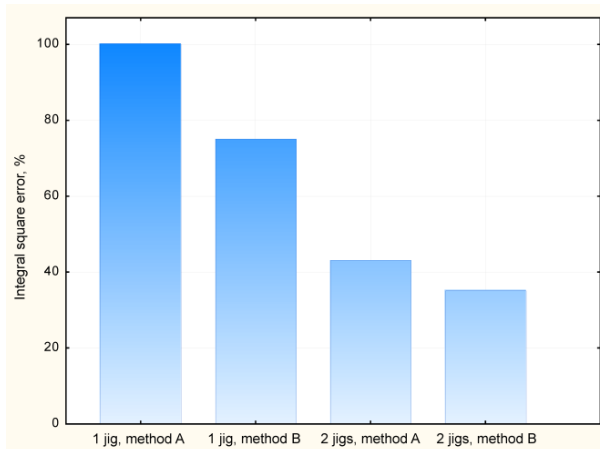


Fig. 5. Values of integral square error for N1 share change of 50%→100%

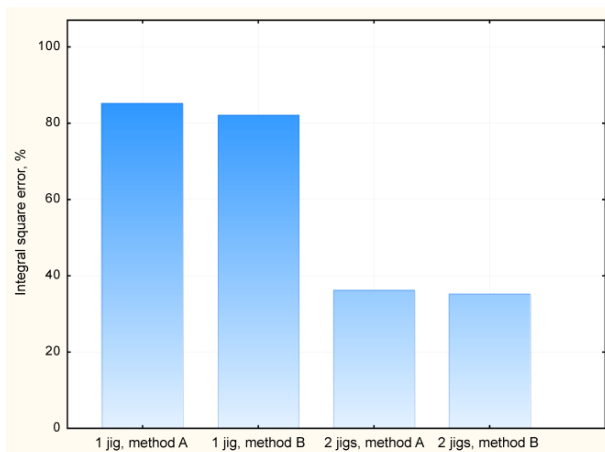


Fig. 6. Values of integral square error for N1 share change of 100%→50%

#### 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*. Proceedings of 19<sup>th</sup> International Conference: Mineral Engineering Conference MEC 2014, Istebna, 15-18 September 2014.
2. Boron S., Pielot J., Wojcacek A.: *Coal cleaning in jig systems – profitability assessment*, Mineral Resources Management, 30(2), 2014, pp. 67-82.

3. Cierpisz S.: *Automatic regulation of coal preparation in jigs* (Automatyczna regulacja procesu wzbogacania węgla w osadzarkach). Silesian University of Technology Press, Gliwice 2012.
4. Cierpisz S.: *Coal production maximization in gravity coal enrichment process control units* (Maksymalizacja produkcji w układach sterowania procesami grawitacyjnego wzbogacania węgla). Proceedings of EMTECH 2016 Conference, Katowice, 2016, pp. 206-212.
5. Cierpisz S., Kaula R.: *Selection of regulator parameters for an inertial object with time delay exemplified on a pulsating jig* (Dobór parametrów regulatora dla obiektu inercyjnego z opóźnieniem na przykładzie osadzarki pulsacyjnej). Mechanizacja i Automatykacja Górnicwa, 3 (517), 2014, pp. 5-13.
6. Głowiak S.: *Impact of the feed grain composition on the efficiency of preparation in a jig* (Wpływ składu ziarnowego nadawy na skuteczność wzbogacania w osadzarce). Proceedings of the 15th Conference of Minerals Processing Automation, Szczyrk, 2-4 June 2009, pp. 37-50.
7. Goodman F., McCreery J.: *Coal Preparation Computer Model*. v.I. U.S. Environmental Protection Agency, Washington 1980.
8. Heyduk A.: *Topographic analysis of two-dimensional images of grains* (Topograficzna analiza dwuwymiarowych obrazów materiału ziarnistego). Mechanizacja i Automatykacja Górnicwa, 2 (456), 2009, pp. 5-10.
9. Heyduk A.: *Non-segmentic methods of visual assessment of grain composition* (Teksturalne (niesegmentacyjne) metody wizyjnej oceny składu ziarnowego). Mechanizacja i Automatykacja Górnicwa, 3 (469), 2010, pp. 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, 2(34), 2014, pp. 217-228.
11. Kaula R.: *Selection of PI regulator settings in the regulation of coal preparation processes* (Dobór nastaw regulatora PI w układach regulacji procesów wzbogacania węgla). Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 31(1), 2015, pp. 141-154.
12. Kaula R., Pielucha W.: *Układ regulacji procesu produkcji mieszanek węgla z regulatorem cyfrowym – studium przypadku*. (Regulation system for coal mixtures production with a digital regulator – case study). 3<sup>rd</sup> Polish Mining Congress, Wrocław 2015.
13. Pielot J.: *An analysis of effects of coal jiggling after changes in the grain composition of a feed*. Archives of Mining Sciences, 55(4), 2010, pp. 827-846.
14. Pielot J.: *Wpływ zmian składu ziarnowego nadawy na efekty wzbogacania węgla w układach osadzarek*. (The impact of changes in the feed grain composition on coal preparation in jigs). Mechanizacja i Automatykacja Górnicwa, 10 (488), 2011, pp. 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). Silesian University of Technology Press, Gliwice 2011.
16. Pielot J.: *Wybrane zagadnienia hierarchicznego sterowania i zarządzania w zakładzie przeróbki węgla – cz.I*. (Selected issues of hierarchical control and management in a coal preparation plant – part 1). Mechanizacja i Automatykacja Górnicwa, 3 (517), 2014, pp. 37-44.
17. PN-88/ M-42000: *Automatyka i pomiary przemysłowe. Terminologia*. (Automation and industrial measurements).
18. Tatjewski P.: *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*. (Advanced control of industrial objects. Structures and algorithms). Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.
19. Trybalski K.: *Analiza właściwości dynamicznych procesów i układów technologicznych przeróbki surowców mineralnych*. (Analysis of dynamic properties of technological processes and systems in minerale processing). Rozprawy Monografie No 83, UW AGH, Kraków 1999.

JOACHIM PIELOT  
WOJCIECH PIELUCHA  
Silesian University of Technology  
joachim.pielot@polsl.pl;

## Analiza efektów wzbogacania węgla w osadzarkach przy zmianach składu ziarnowego nadawy

*Jednym z podstawowych procesów przeróbki węgla jest wzbogacanie w osadzarkach wodnych. Efekty tego procesu zależą od wzbogalności węgla surowego oraz od składu ziarnowego nadawy. Przy zmianie składu ziarnowego, aby zachować stałą zadaną jakość koncentratu, konieczna jest zmiana gęstości rozdziału w osadzarkach (poprzez zmianę natężenia przepływu produktu dolnego). W artykule podjęto próbę wstępnego oszacowania, w jakim stopniu analiza składu ziarnowego nadawy (w trybie on-line) do układów technologicznych – jednej osadzarki oraz dwóch osadzarek wzbogacających posobnie – może poprawić efektywność wzbogacania, uwzględniając własności dynamiczne osadzarki. Osadzarka ma charakter obiektu inercyjnego z opóźnieniem czasowym – transportowym. Przedstawione zostały dynamiczne efekty wzbogacania przy zmianach składu ziarnowego nadawy.*

Słowa kluczowe: wzbogacanie węgla w osadzarkach, skład ziarnowy węgla, sterowanie on-line, dynamika sterowania.

### 1. WSTĘP

---

Wynikiem procesów przeróbki węgla może być różna ilość i jakość produktów, które zależą od wzbogalności węgla surowego, składu ziarnowego (szczególnie przy wzbogacaniu węgla w osadzarkach obserwowany jest istotny wpływ zmian składu ziarnowego na efektywność wzbogacania [6]), rodzaju operacji przerobczych w układzie technologicznym przeróbki węgla, parametrów rozdziału tych operacji oraz niedokładności wzbogacania. Niedokładność wzbogacania jest spowodowana nieidealnym przebiegiem procesu. Skutkiem tego jest nieidealny kształt krzywych rozdziału [7, 15], które służą do modelowania procesów wzbogacania we wzbogacalnikach grawitacyjnych. Na kształt krzywych rozdziału ma wpływ, zwłaszcza w osadzarkach, wielkość ziarn – im mniejsze ziarna, tym kształt krzywych jest gorszy, gdyż bardziej odbiega od kształtu idealnego. Kształt krzywych rozdziału pozwala prognozować ilość i jakość koncentratów.

Niniejszy artykuł jest kontynuacją pracy [1], a jednocześnie wstępnym rozeznaniem wpływu własności dynamicznych osadzarek na efekty wzbogacania w warunkach zmienności składu ziarnowego nadawy. Porównane zostały w nim dynamiczne efekty wzboga-

cania oraz dokonana została wstępna ocena reakcji układu wzbogacania przy odpowiednich zmianach sterowań w przypadku symulowanych zmian składu ziarnowego węgla surowego. W dalszych pracach będą uwzględnione bardziej zróżnicowane przypadki zmian składu ziarnowego w różnych układach technologicznych. Zamiarem docelowym prac prowadzonych w Katedrze Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa jest wizyjna identyfikacja on-line zmienności składu ziarnowego [8, 9], dzięki której możliwe będzie wymuszanie w układach sterowania bezpośredniego (z wykorzystaniem warstw optymalizacji i sterowania nadrzędnego [16] oraz algorytmów regulacji adaptacyjnej) zmian gęstości rozdziału w taki sposób, aby stabilizować jakość koncentratu, co powinno skutkować zwiększeniem wartości produkcji.

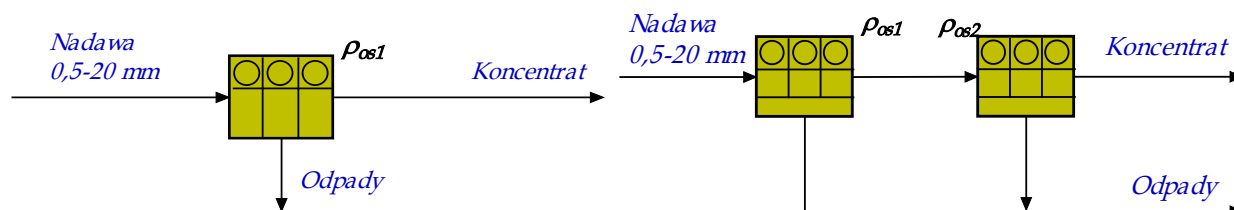
### 2. ROZPATRYWANE UKŁADY TECHNOLOGICZNE

---

W pracy [10] przedstawiony został wpływ zmian składu ziarnowego na efekty wzbogacania w pojedynczej osadzarce oraz w układach równoległego wzbogacania w dwóch i trzech osadzarkach, natomiast



w pracy [1] – w dwóch układach wzbogacania posobnego w dwóch i trzech osadzarkach, w których ponownie wzbogacane są koncentraty przejściowe, oraz w układzie z recyrkulacją produktu przejściowego. Przedstawione analizy dotyczyły tylko stanów statycznych, bez uwzględniania stanów przejściowych podczas zmian sterowań w układzie. Tutaj zaprezentowany został wpływ zmian składu ziarnowego na wybrane wskaźniki jakości sterowania przy nastawach regulatora PI dobranych dwiema metodami.



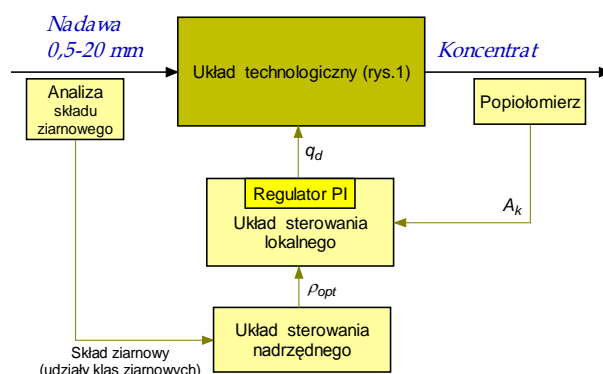
Rys. 1. Rozpatrywane układy wzbogacania

Obecnie, jakość koncentratu określa się poprzez pomiar zawartości popiołu w trybie on-line, a wynik tego pomiaru służy do korekty gęstości rozdziału – jest to podstawowy sposób stabilizacji jakości koncentratu. Przez gęstość rozdziału rozumiana jest gęstość frakcji wzbogacanego węgla, przechodzącej w połowie do koncentratu i w połowie do odpadów.

W przypadku wzbogacania w osadzarkach pojęcie gęstości rozdziału jest pojęciem teoretycznym, zasadniczym parametrem mającym wpływ na gęstość rozdziału w osadzarce jest natężenie przepływu produktu dolnego [3]. Zamiast gęstości rozdziału należy wyznaczyć gęstość warstwy rozdziału produktów wzbogacania [4]. W rozwiązaniach praktycznych położenie warstwy materiału o zadanej gęstości określa się za pomocą pływaka, będącego czujnikiem w układzie automatycznej regulacji odbioru produktu dolnego. W najnowszych układach regulacji pracy osadzarek stosuje się dodatkowo gęstościomierz izotopowy zainstalowany w strefie odbioru produktów wzbogacania, który służy do korekcji błędów pomiarowych pływaka przy niestabilnej pracy osadzarki [3]. Z uwagi jednak na charakter artykułu, którego celem jest zaprezentowanie potencjalnych efektów sterowania przy zastosowaniu analizy składu ziarnowego w trybie on-line, uzasadnione jest posługiwanie się teoretycznym pojęciem gęstości rozdziału<sup>1</sup>.

Na rys. 2. przedstawiono schemat blokowy układu regulacji pracy osadzarki albo dwóch osadzarek wzbogających posobnie. Z układu analizy wizyjnej

uzyskiwana jest informacja o aktualnym składzie ziarnowym nadawy [8, 9]. W układzie sterowania nadrzędnego dobierana jest (zależna od składu ziarnowego) optymalna gęstość rozdziału  $\rho_{opt}$  dla zadanej zawartości popiołu w koncentracie. Równocześnie na podstawie pomiaru zawartości popiołu w koncentracie  $A_k$  regulator dokonuje zmian natężenia przepływu produktu dolnego, co skutkuje zmianą wartości gęstości rozdziału w osadzarce lub w dwóch osadzarkach. Nadmienić należy, że w układach wzbogacania posobnego w dwóch (albo w trzech) wzbogacalnikach optymalne gęstości rozdziału w poszczególnych wzbogacalnikach są zawsze identyczne, dzięki czemu niedokładność wzbogacania przyjmuje minimalną wartość, a kształt krzywych rozdziału jest najbardziej zbliżony do kształtu idealnego [15].



Rys. 2. Schemat blokowy układu regulacji dla jednej z dwóch osadzarek (jak na rys. 1)

Wykorzystanie analizy składu ziarnowego nadawy w trybie on-line umożliwi znacznie szybszą reakcję układów sterowania, nawet o kilka minut w porównaniu do sposobu podstawowego, tylko z wyko-

<sup>1</sup> W przypadku ewentualnych realizacji praktycznych z wykorzystaniem układu analizy składu ziarnowego gęstość rozdziału zostanie zastąpiona gęstością warstwy rozdziału produktów wzbogacania lub zostaną przeprowadzone badania dotyczące wzajemnej korelacji tych wielkości.

rzystaniem popiołomierza. W efekcie szybszych zmian sterowań osadzarek produkowane koncentraty mogą mieć stabilniejsze w czasie parametry jakościowe, co może prowadzić do zwiększenia wartości produkcji.

Do obliczeń symulacyjnych przyjęte zostały charakterystyki węgla surowego trudno wzbogacalnego. W tab. 1. podana jest charakterystyka składu ziarnowego, a w tab. 2. – charakterystyka gęstościowo-jakościowa, taka sama w przypadku wszystkich klas ziarnowych.

**Tabela 1.**  
**Charakterystyka składu ziarnowego nadawy węgla surowego**

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

**Charakterystyka gęstościowo-jakościowa nadawy (0,5-20 mm)**

Gęstość frakcji g/cm <sup>3</sup>	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	19 960

**Tabela 2.**

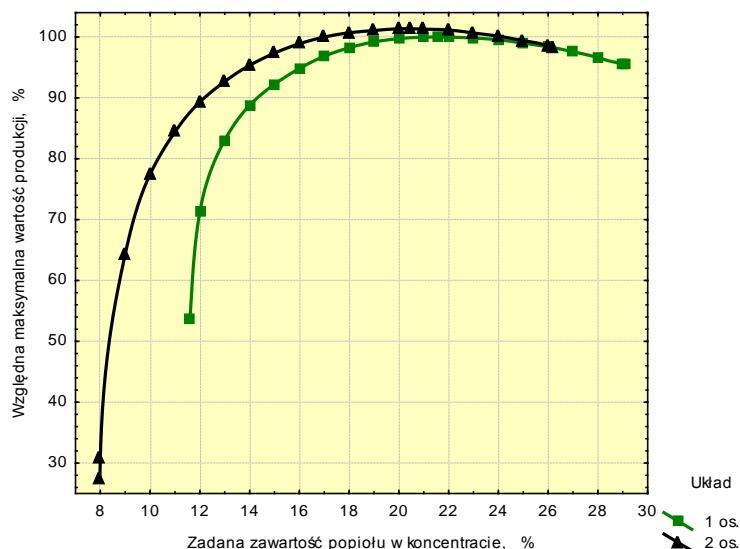
### 3. ANALIZA PORÓWNAWCZA EFEKTÓW WZBOGACANIA

Do prognozowania efektów wzbogacania węgla w osadzarkach wykorzystane zostały modele krzywych rozdziału zidentyfikowane dla różnych klas ziarnowych nadawy [7]. Na rys. 3. przedstawiono maksymalne, możliwe do uzyskania, wartości produkcji przy stałym składzie ziarnowym nadawy i różnej zadanej jakości koncentratów [1, 15]. W obliczeniach optymalizacyjnych wykorzystano algorytm maksymalizacji produkcji o zadanej jakości [15]. Układ z jedną osadzką jest układem odniesienia, dlatego maksymalnej wartości produkcji, możliwej do uzyskania w tym układzie, przypisano wartość względną 100%<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> W układach wzbogacania posobnego poprawa dokładności wzbogacania skutkuje lepszą jakością koncentratu przy takich samych gęstościach rozdziału jak w układzie z jedną osadzką. Aby więc uzyskać zadaną zawartość popiołu w koncentracie, należy zwiększyć gęstości rozdziału, co powoduje zwiększenie ilości koncentratu i wartości produkcji w stosunku do wartości uzyskiwanych w układzie z jedną osadzką. W pracy [2] wykazano, że przy dobrej jakości koncentratu przyrost wartości produkcji przewyższa koszty inwestycyjne i eksploatacyjne drugiej osadzarki, która może być ponadto maszyną o mniejszej wydajności z racji wzbogacania mniejszej ilości materiału.

#### 3.1. Zmiany składu ziarnowego węgla surowego

Wzbogacalność, skład ziarnowy i natężenie przepływu węgla surowego są parametrami zmiennymi. Jeśli nadawa do zakładu przeróbki węgla gromadzona jest w zbiorniku buforowym, wtedy stabilizowane jest natężenie przepływu oraz zachodzi pewne uśrednianie parametrów jakościowych. W artykule założono, że natężenie przepływu nadawy jest stałe, a charakterystyka gęstościowo-jakościowa jest niezmienna; uwzględnione zostały jedynie prognozy wpływu zmian składu ziarnowego [13, 14]. Przyjęto, że zmiany składu ziarnowego polegają na zmianach udziałów poszczególnych klas ziarnowych w węglu surowym. Z tego powodu nadawa została rozdzielona na dwie nadawy, N1 oraz N2, o różnym składzie ziarnowym (Tab. 3), ale takiej samej charakterystyce gęstościowo-jakościowej (Tab. 2). Różne udziały poszczególnych klas ziarnowych skutkują innymi warunkami wzbogacania, co modelowane jest w ten sposób, że przyjmowane są różne krzywe rozdziału dla różnych klas ziarnowych nadawy [7, 15].



Rys. 3. Względna maksymalna wartość produkcji koncentratu końcowego dla całego możliwego do uzyskania zakresu zawartości popiołu

**Tabela 3.**  
**Charakterystyka składu ziarnowego nadaw N1 oraz N2**

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

Aby zbadać wpływ zmian składu ziarnowego, na jakość produktu, założono, że nadawa składa się z dwóch nadaw, N1 i N2 (tab. 3), mieszanych w takich proporcjach, że ich sumaryczny udział jest zawsze równy 100% [1, 15]. Wzrost udziału nadawy N1 od 0 do 100% odpowiada równoczesnemu zmniejszaniu się udziału nadawy N2 od 100 do 0%. W przypadku, gdy udziały obydwu nadaw, N1 i N2, są równe 50%, wtedy udziały wszystkich trzech klas ziarnowych są w przybliżeniu równe – takie jak w tab. 1; jest to więc przypadek odzwierciedlający sytuację wyjściową i jest traktowany jako wzbogacanie bez zakłóceń składu ziarnowego. Ponieważ charakterystyka gęstościowo-jakościowa jest identyczna dla wszystkich klas ziarnowych (tab. 2), więc zmiany udziałów nadaw N1 i N2 skutkują tylko zmianami składu ziarnowego bez zmian charakterystyki gęstościowo-jakościowej [1].

Wyniki wszystkich niżej podanych prognoz symulacyjnych zostały zrealizowane przy stałej całkowitej masie obydwu nadaw, ale zmiennych udziałach ilościowych nadaw N1 i N2. Wzrost udziału nadawy N1 (przy jednoczesnym zmniejszaniu się udziału nadawy

N2) oznacza większą ilość ziarn największych (klasa 3), wzbogacanych dokładniej; oznacza jednocześnie mniejszą ilość ziarn najdrobniejszych (klasa 1), wzbogacanych z gorszą dokładnością. Udział ziarn pośrednich (klasa 2) pozostawał każdorazowo niezmienny. Przy wzroście udziału nadawy N1 – i jednoczesnym zmniejszaniu się udziału nadawy N2 – można więc mówić o poprawie składu ziarnowego nadawy, w sensie poprawy dokładności wzbogacania. W dalszym ciągu pod pojęciem zmian składu ziarnowego rozumiane są tak określone zmiany wzajemnych udziałów nadaw N1 i N2 [1].

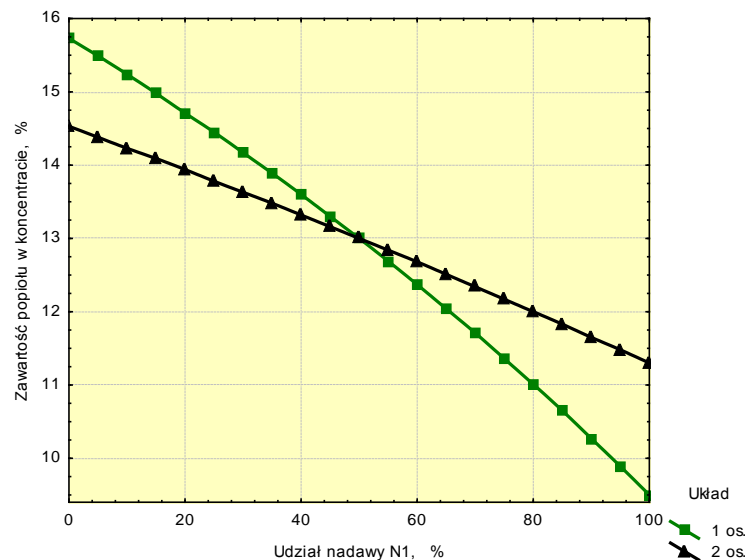
Na rys. 4. zilustrowany jest wpływ zmian udziału nadaw N1 i N2 na zawartość popiołu w koncentracie przy niezmiennych, optymalnych gęstościach rozdziału, dobranych dla równych udziałów obydwu nadaw, N1 i N2 (w warunkach braku zakłóceń składu ziarnowego), przy zadanej zawartości popiołu w koncentracie, równej 13%. Zmianom udziału nadawy N1 w zakresie 0÷100% odpowiadają jednocześnie zmiany udziału nadawy N2 w zakresie 100÷0%.

### 3.2. Porównanie dynamicznych efektów wzbogacania przy zmianach składu ziarnowego

W układach technologicznych wzbogacania węgla kamiennego jakość koncentratu określana jest za pomocą pomiaru w trybie on-line zawartości popiołu w koncentracie. Ponieważ proces wzbogacania w osadzarce jest jednak wrażliwy na zmiany składu ziarnowego węgla surowego (rys. 4), wskazana jest szybka reakcja układów sterowania pracą osadzarek na takie zmiany. Pomiar zawartości popiołu

w koncentracie jest oczywiście informacją miarodajną dla wypracowania zmian gęstości rozdziału, jest to jednak informacja opóźniona o kilka minut z racji czasów transportu wzbogacanego materiału w osadzarkach i przesiewaczach. Z tego względu zastosowanie analizy składu ziarnowego w trybie on-line nadawcy do wzbogacania umożliwia szybszą o kilka minut reakcję układów sterowania na zmiany składu ziarnowego. Przyrosty wartości produkcji

wyznaczone w opracowaniach [1, 10] dotyczą właśnie porównania wartości produkcji w układach bez analizy składu ziarnowego i z analizą on-line składu ziarnowego. Wyniki te zostały uzyskane dla stanów statycznych, z uwzględnieniem czasu transportu wzbogacanego węgla w jednej osadzarce (2 min), jednak z pominięciem inercji osadzarek i układów regulacji.



Rys. 4. Zawartość popiołu w koncentracie w układach z rys. 1. przy różnych proporcjach nadaw N1 i N2;  
 $A_{zad} = 13\%$

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej dynamicznych efektów wzbogacania przyjęto model osadzarki jako obiektu inercyjnego z opóźnieniem czasowym – transportowym [3, 19]. Procesy przeróbki kopalin, również wzbogacanie w osadzarkach, są procesami nieliniowymi i parametry zastępcze obiektu są różne dla dodatnich i ujemnych zmian wartości zadanej [12]. Parametry obiektu dla dodatnich (wzrost udziału nadawy N1) i ujemnych (zmniejszenie udziału nadawy N1) zmian sygnału wejściowego dobrano na podstawie opracowania [5]. Dokonano porównania efektów działania układów regulacji w rozpatrywanych układach technologicznych z jedną i dwiema osadzarkami.

Jako algorytm regulacji przyjęto przyrostowy regulator PI, opisany wzorami:

$$u[n] = u[n-1] + \Delta u[n] \quad (1 \text{ Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.})$$

$$\Delta u[n] = k_p \left\{ e[n] - e[n-1] + \frac{T_s}{T_i} e[n] \right\} \quad (2 \text{ Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.})$$

gdzie:

$q_d$  – natężenie przepływu produktu dolnego,  
 $e$  – błąd regulacji,

$k_p$  – wzmacnienie regulatora,  
 $T_s$  – okres próbkowania,  $T_s = 1$  s  
 $T_i$  – czas zdwojenia regulatora.

W obydwu układach technologicznych przyjęto skokowe zmiany składu ziarnowego, wyrażone w procentowych udziałach dwóch nadaw, N1 i N2, o różnym składzie ziarnowym, przedstawione w tab. 4.

Na zmiany składu ziarnowego nadawcy powinny reagować układy sterowania (warstwy optymalizacji, sterowania nadrzędnego i sterowania bezpośredniego [16, 18]) i w efekcie tego wymuszać odpowiednie zmiany gęstości rozdziału.

Tabela 4.

#### Zmiany składu ziarnowego nadawy

Lp.	Udziały nadaw	
	N1	N2
1.	50%→75%	50%→25%
2.	50%→100%	50%→0%
3.	25%→50%	75%→50%
4.	100%→50%	50%→100%
5.	75%→50%	25%→50%
6.	50%→25%	50%→75%

Przyjęto, że zawartość popiołu w koncentraty z obydwu układów technologicznych  $A_k = 13\%$ . Wykorzystując algorytm maksymalizacji produkcji o zadanej jakości [15], wyznaczono optymalne gęstości rozdziału w osadzarkach przy różnych udziałach nadaw N1 i N2. Zmiany gęstości rozdziału, konieczne do ponownego uzyskania zadanej zawartości popiołu w koncentraty (13%), przedstawiono w tab. 5. (dla układu z jedną osadzarką) oraz w tab. 6. (dla układu z dwiema osadzarkami).

Dla podanych zmian gęstości rozdziału przyjęto nastawy regulatora dobrane według dwóch metod:

- A. metody bezpośredniej z warunkiem na zapas fazy, opisanej w [11];
- B. metody zmodyfikowanej, w której zwiększono wzmocnienie regulatora o połowę i ponownie przeprowadzono prognozy symulacyjne dla tych samych zmian składu ziarnowego.

Na podstawie otrzymanych przebiegów wyznaczono wskaźniki jakości regulacji, opisane w normie [17]:

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

W tab. 7. zestawione zostały wartości nastaw regulatora oraz trzech wyżej wymienionych wskaźników jakości regulacji w obydwu rozpatrywanych układach przy wykorzystaniu dwóch metod, A i B. Wartość odniesienia (100%) odpowiada całce z kwadratu błędu regulacji (ISE) dla przypadku zmian udziału nadawy N1 z 50 do 100% w układzie odniesienia z jedną osadzarką.

Tabela 5.

**Wymagane zmiany gęstości rozdziału w układzie z jedną osadzarką**

Zmiana składu ziarnowego (jak w tab. 4)	$\rho_{os1}$ g/cm <sup>3</sup>
1.	1,541→1,630
2.	1,541→1,710
3.	1,425→1,541
4.	1,710→1,541
5.	1,630→1,541
6.	1,541→1,425

Tabela 6.

**Wymagane zmiany gęstości rozdziału w układzie z dwiema osadzarkami**

Zmiana składu ziarnowego (jak w tab. 4)	$\rho_{os1}$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{os2}$ g/cm <sup>3</sup>
1.	1,701→1,739	1,700→1,739
2.	1,701→1,779	1,700→1,779
3.	1,664→1,701	1,663→1,700
4.	1,779→1,701	1,779→1,700
5.	1,739→1,701	1,739→1,700
6.	1,701→1,664	1,700→1,663

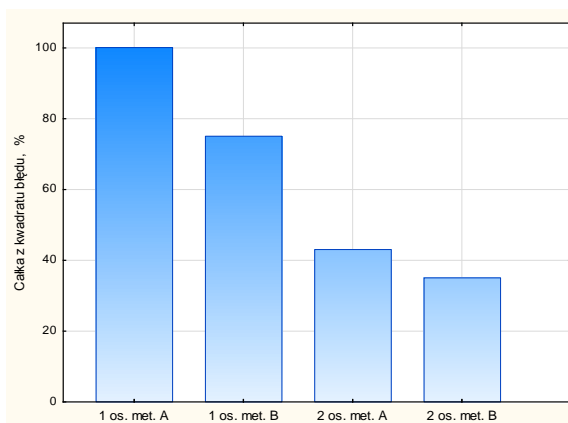
Tabela 7.

**Nastawy oraz wskaźniki jakości regulacji dla rozpatrywanych układów**

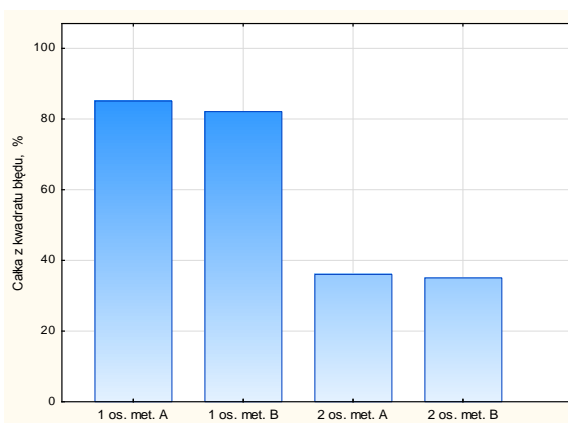
Zmiana składu ziarnowego (jak w tab. 4)	Układ	$k_p$	$T_i$ s	Czas regulacji s	Czas narastania s	ISE %
Nastawy dobrane według metody doboru A						
1.	1 os.	195	30	194	70	117
1.	2 os.	195	30	380	140	43
2.	1 os.	195	30	200	71	100
2.	2 os.	195	30	388	140	43
3.	1 os.	195	30	196	71	199
3.	2 os.	195	30	384	140	43
4.	1 os.	208	10	26	8	85
4.	2 os.	208	10	52	16	36
5.	1 os.	208	10	25	7	99
5.	2 os.	208	10	52	16	36
6.	1 os.	208	10	26	8	167
6.	2 os.	208	10	52	16	36

Zmiana składu ziarnowego (jak w tab. 4)	Układ	$k_p$	$T_i$ s	Czas regulacji s	Czas nara- stania s	ISE %
Nastawy zmodyfikowane – metoda B						
1.	1 os.	292,5	30	230	32	96
1.	2 os.	292,5	30	376	82	35
2.	1 os.	292,5	30	247	47	75
2.	2 os.	292,5	30	374	82	35
3.	1 os.	292,5	30	235	34	96
3.	2 os.	292,5	30	374	82	35
4.	1 os.	312	10	42	4	82
4.	2 os.	312	10	48	10	35
5.	1 os.	312	10	43	5	96
5.	2 os.	312	10	48	12	35
6.	1 os.	312	10	42	5	163
6.	2 os.	312	10	48	10	35

Na rys. 5. oraz 6. przedstawiono względne wartości całki z kwadratu błędu dla jednej ze zmian składu ziarnowego nadawy. Rys. 5. ilustruje wartości dla zmiany udziału nadawy N1 z 50 do 100%, natomiast rys. 6. – dla zmiany tej samej nadawy ze 100 do 50%.



Rys. 5. Wartości całki z kwadratu błędu dla zmiany udziału nadawy N1 50%→100%



Rys. 6. Wartości całki z kwadratu błędu dla zmiany udziału nadawy N1 100%→50%

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych analiz symulacyjnych można stwierdzić, że:

- lepsze efekty wzbogacania uzyskuje się poprzez zastosowanie układu dwóch osadzarek wzbogacających posobnie; wartość produkcji jest większa, a zastosowanie drugiej osadzarki może być ekonomicznie opłacalne (patrz przypis 2.);
- wskaźniki czasowe regulacji w układzie dwóch osadzarek mają większą wartość niż w przypadku układu z jedną osadzką; wynika to z zastosowania dwóch maszyn o podobnych parametrach, przez co czas wykonywania operacji przerobowej wydłuża się;
- wartość całki z kwadratu błędu dla zmian zadanej gęstości rozdziału dla dwóch osadzarek jest znacząco mniejsza niż w przypadku jednej osadzarki;
- opisana modyfikacja nastaw regulatora (metoda B) powoduje nieznaczny wzrost czasu regulacji, lecz zarazem skrócenie czasu narastania; wartość całki z kwadratu błędu znacząco maleje tylko w przypadku dodatnich zmian zadanej gęstości rozdziału;
- przedstawione wyniki pozwalają na podjęcie prac nad określeniem wpływu zmian składu ziarnowego nadawy na parametry dynamiczne osadzarki oraz układu osadzarek, jako obiektów regulacji, a tym samym nad opracowaniem adaptacyjnego algorytmu regulacji osadzarek pulsacyjnych.

## Literatura

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 Przetwarzania Kopaliny, Istebna, 15-18 września 2014.
2. Boron S., Pielot J., Wojaczek A.: *Coal cleaning in jig systems – profitability assessment*, Mineral Resources Management, 30(2), 2014, s. 67-82.
3. Cierpisz S.: *Automatyczna regulacja procesu wzbogacania węgla w osadzarkach*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
4. Cierpisz S.: *Maksymalizacja produkcji w układach sterowania procesami grawitacyjnego wzbogacania węgla*, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej EMTECH 2016, Katowice 7-8 kwietnia 2016, s. 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), 2014, s. 5-13.
6. Głowiak S.: *Wpływ składu ziarnowego nadawy na skuteczność wzbogacania w osadzarkach*, Materiały XV Konferencji Automatyzacji Procesów Przetwarzania Kopaliny, Szczecin, 2-4 czerwca 2009, s. 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), 2009, s. 5-10.
9. Heyduk A.: *Teksturalne (niesegmentacyjne) metody wizyjnej oceny składu ziarnowego*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 3 (469), 2010, s. 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, 2 (34), 2014, s. 217-228.
11. Kaula R.: *Dobór nastaw regulatora PI w układach regulacji procesów wzbogacania węgla*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 31(1), 2005, s. 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, 4 (55), 2010, pp. 827-846.
14. Pielot J.: *Wpływ zmian składu ziarnowego nadawy na efekty wzbogacania węgla w układach osadzarek*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 10 (488), 2011, s. 32-39.
15. Pielot J.: *Wielokryterialna optymalizacja produkcji układów technologicznych grup wzbogacalników grawitacyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
16. Pielot J.: *Wybrane zagadnienia hierarchicznego sterowania i zarządzania w zakładzie przetworzenia węgla – cz. I*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 3 (517) 2014, s. 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 przetworzenia surowców mineralnych*. Rozprawy, Monografie, nr 83, UW AGH, Kraków 1999.

JOACHIM PIELOT  
WOJCIECH PIELUCHA  
Politechnika Śląska  
joachim.pielot@polsl.pl;