



Statyczne i dynamiczne modele symulacyjne procesów wzbogacania węgla

Simulation of coal preparation processes – static and dynamic models

Stanisław CIERPISZ ¹⁾

¹⁾ Prof. dr hab. inż. Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa, ul. Akademicka 2, 44-101 Gliwice; tel.: (+48-32) 237-23-80, fax: (+48-32) 237-15-37, e-mail: cierpiz@zeus.polsl.gliwice.pl

RECENZENCI: prof. Toshio INOUE; dr hab. inż. Kazimierz Trybalski, prof. AGH

Streszczenie

Symulacja komputerowa jest szeroko stosowana w projektowaniu i analizie procesów wzbogacania węgla. Opracowane dotychczas programy symulacyjne są oparte o statyczne modele jednostkowych procesów takich jak przesiewanie, wzbogacanie w cieczach ciężkich, osadzarkach i flotacji, kruszenie węgla, produkcja mieszanek i rozdzielanie strumieni materiału. Model symulacyjny omawiany w niniejszym artykule zawiera procedury optymalizacyjne dla właściwego doboru parametrów technologicznych procesu (np. gęstości rozdziału, oczka sit, proporcje strumieni produktów). Program symulacyjny umożliwia ocenę efektów sterowania przebiegiem procesów przeróbki węgla oraz analizę działania różnych algorytmów sterowania. W artykule przedstawiono również dynamiczny model symulacyjny, który może być stosowany do analizy stanów przejściowych w zakładzie wzbogacania węgla. Podstawowe moduły modelu są opisane przez charakterystyki statyczne i dynamiczne. Dynamiczny model symulacyjny może być stosowany do badania wpływu zmian charakterystyk węgla surowego na efekty wzbogacania poszczególnych węzłów jak i całego układu technologicznego, obserwacji zmian parametrów produktów wzbogacania w funkcji czasu, znajdowania „wąskich gardel” w układzie technologicznym, badania stanów awaryjnych w zakładzie. Model symulacyjny może być również stosowany do projektowania układów sterowania takich jak produkcja mieszanek węgla, sterowanie procesem wzbogacania węgla w cieczach ciężkich i osadzarkach oraz nadrzędne sterowanie całego zakładu.

Summary

Computer simulation is widely used for the design and analysis of coal preparation processes. Simulation programmes developed so far are based on static models of unit processes such as coal screening, washing in heavy media vessels and jigs, flotation, crushing, blending and coal streams splitting. The software package presented in the paper incorporates control optimisation procedures for a proper choice of technological parameters (i.e. densities of separation, screens diameters, proportion of product streams). The program allows to evaluate effects of complex control systems operation and to analyse various algorithms of the control. The paper also presents a dynamic simulation model which can be used for the analysis of transient states in a coal preparation plant. The basic modules of the model have been modelled with the use of static and dynamic characteristics. The dynamic simulator can be used for the analysis of influence of raw coal characteristic variation on the performance of units and the whole plant, observation of products streams variations with time, finding of bottle-necks in the technological layout, testing of emergency states in the plant. The simulator can be also applied in the design and analysis of control systems such as coal blending, control of heavy media vessels and jigs and overall plant control.

1. Wstęp

W ostatnich latach w zakładach wzbogacania węgla zastosowano szereg lokalnych układów automatyki do procesów wzbogacania węgla w cieczach ciężkich, w osadzarkach i procesie flotacji, produkcji mieszanek węgla i załadunku produktów do wagonów i samochodów, sterowania obiegu wodno-mułowego oraz procesów odwadniania miałów węglowych. Większość systemów opartych jest o technikę mikroprocesorową z zastosowaniem algorytmów sterowania, których celem jest stabilizacja parametrów jakościowych koncentratów węgla w poszczególnych procesach technologicznych, kontrola natężenia przepływu produktów oraz stabilizacja pracy obiegu wodno-mułowego.

1. Introduction

A number of local control systems applied currently in coal preparation plants are designed for the control of coal washing in heavy media process, in jigs and flotation, coal blending and coal loading to wagons and lorries, control of slurry circuits and de-watering of fine coal. Most of the systems are based on microcomputer technique with control algorithms focused on stabilisation of coal quality parameters in concentrates produced in unit processes, control of flows (tonnage) of product streams and stabilisation of water and slurry circuits operation.

Coal preparation plants are currently considering the introduction of more complex control pro-

Zakłady wzbogacania węgla są obecnie zainteresowane wprowadzaniem bardziej zaawansowanych układów sterowania. Maksymalizacja wychodu produktów o zadanych parametrach jakościowych lub optymalizacja efektu ekonomicznego pracy całego zakładu staje się obecnie zasadniczym celem systemu sterowania. Opracowanie takiego systemu sterowania wymaga szczegółowej znajomości i zrozumienia przebiegu procesów technologicznych, ich charakterystyk i wzajemnego wpływu poszczególnych procesów. Symulacja komputerowa jest wygodnym narzędziem dla projektowania i oceny działania takich kompleksowych systemów sterowania [1, 4, 7].

W artykule przedstawiono program symulacyjny do analizy procesów wzbogacania węgla i sterowania tymi procesami. Program „Syrom” [3] umożliwia symulację pracy układów technologicznych składających się z jednostkowych operacji przesiewania, wzbogacania węgla w cieczach ciężkich, osadzarkach i cyklonach, produkcji mieszanek węgla i rozdzielania strumieni materiału w procesie technologicznym. Program zawiera procedury optymalizacyjne służące do właściwego doboru parametrów technologicznych (np. gęstości rozdziału, oczka sita, proporcje łączonych strumieni). Program umożliwia ocenę efektów działania kompleksowych układów sterowania i analizę działania różnych algorytmów sterowania.

W artykule przedstawiono również dynamiczny model symulacyjny, który może być stosowany do analizy procesów przejściowych w zakładzie wzbogacania węgla. Podstawowe moduły modelu opisane są przy pomocy charakterystyk statycznych i dynamicznych. Statyczne charakterystyki oparte są o charakterystyki wzbogalności węgla podane w formie tablicowej, krzywe rozdziału dla wzbogalników grawitacyjnych oraz o zależności parametrów ilościowych i jakościowych produktów w funkcji parametrów sterujących. Charakterystyki dynamiczne są określane przez stałe czasowe oraz czasy opóźnień wprowadzane przez maszyny przeróbcze, układy transportowe, magazynowanie i uśrednianie węgla w zbiornikach.

2. Statyczny model symulacyjny

Komputerowy model symulacyjny „Syrom” wykorzystuje współczynniki rozdziału [6], które określają prawdopodobieństwo α_{ij} z którym dana elementarna frakcja (klasa ziarnowa – j i gęstość – i) przechodzi do danego produktu (do koncentratu w przypadku wzbogalników grawitacyjnych lub do produktu górnego w przypadku procesu przesiewania).

Na rys. 1 przedstawiono strukturę pojedynczej operacji przeróbczej. Model symulacyjny może

cedures. Maximisation of yields of desired quality saleable products or optimisation of total economic effect of the plant production are the main tasks for control systems at present. Design of such systems requires a thorough understanding of the whole technological process, its characteristics and interaction among unit operations in the plant. Computer simulation is a convenient tool for designing and evaluating of such complex systems [1, 4, 7].

In the paper a computer simulation program for coal preparation processes analysis and their control has been presented. The software package „Syrom” [3] allows to simulate operation of technological systems consisting of unit processes of coal screening, washing in heavy media circuits, jigs and cyclones, blending of different products and stream splitting. The package incorporates optimisation procedures for a proper choice of technological parameters (i.e. densities of separation, diameter of screen, proportion of product streams). The program allows to evaluate effects of complex control systems operation and to analyse various algorithms of the process control.

The paper also presents a dynamic simulation model which can be used for the analysis of transient states in a coal preparation plant. The basic modules of the model have been modelled with the use of static and dynamic characteristics. Static characteristics apply coal washability characteristics in the form of tables, partition curves for gravitational washers, and product parameters (yield/ash) as a function of control signals. Dynamic characteristics are represented by time constants and delays of unit operations, transport delays, storage and coal blending in bunkers.

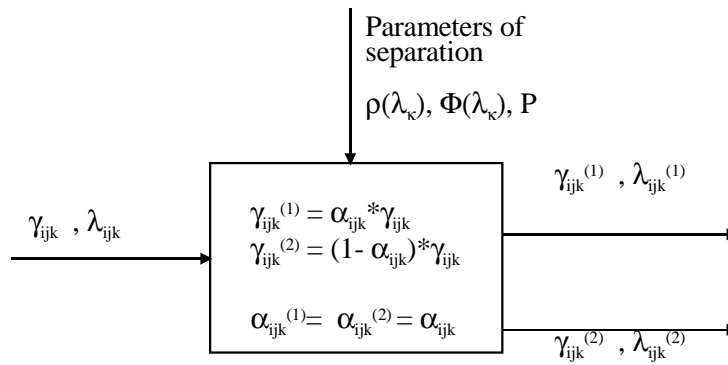
2. Static simulation model

The computer simulation model “Syrom” is based on partition coefficients [6] which determine the probability α_{ij} with which a given elementary fraction (of size- j and density- i) of coal will report to the chosen product (for instance to the concentrate in the case of gravitational separators or to the upper product in the case of screening process).

Fig. 1 illustrates the structure of the model for a single preparation procedure. The full model of a technological process can consist of up to 20 unit

zawierać do 20 operacji jednostkowych (z uwzględnieniem strumieni recyrkulacyjnych).

processes linked with each other (also with recirculation of streams).



Rys. 1
Model procesu rozdziału

Fig.1
The model of a technological separation process

Udział (wychód) *i-tej* gęstościowej i *j-tej* ziarnowej frakcji nadawy (o danych parametrach jakościowych — zawartość popiołu, siarki, wartość opałowa — związanych z tą frakcją) w strumieniach z *k-tej* operacji technologicznej wyznacza się w modelu z następujących związków:

The yield and quality parameters (ash, calorific value, sulphur) of *i-th* density and *j-th* size fraction in output products (streams) from the *k-th* unit are calculated according to the following equations:

$$\gamma_{ijk}^{(1)} = \alpha_{ijk} \cdot \gamma_{ijk} \quad \gamma_{ijk}^{(2)} = (1 - \alpha_{ijk}) \cdot \gamma_{ijk} \quad \lambda_{ijk}^{(1)} = \lambda_{ijk}^{(2)} = \lambda_{ijk} \quad (1)$$

Udział *ij-tej* frakcji w *k-tym* strumieniu (1 — pierwszy produkt, 2 — drugi produkt) można również wyznaczyć dla procesu przechodzenia poszczególnych frakcji przez kolejne operacje technologiczne:

Yield of the *ij-th* fraction in the *k-th* stream (1 — first or 2 — second output) can be also calculated for the whole preparation process of the feed (raw coal):

$$\gamma_{ijk}^{(1,2)} = \sum_{t=1}^{N_T} \prod_{k=1}^{N_k} c_{k,t} \cdot \gamma_{ij} \quad (2)$$

$$c_{k,t} \begin{cases} 0 \\ \alpha_{ijk} \\ 1 - \alpha_{ijk} \end{cases} \begin{cases} \text{— dla nieaktywnej } k\text{-tej operacji} \\ \text{— dla aktywnego 1-go strumienia (produktu)} \\ \text{— dla aktywnego } k\text{-tej} \text{ jednostki (output 1 - processing the coal stream)} \\ \text{— dla aktywnego 2-go strumienia (produktu)} \\ \text{— dla aktywnego } k\text{-tej} \text{ jednostki (output 2 - processing the coal stream)} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

- γ_{ij} — udział *i-tej* frakcji gęstościowej i *j-tej* frakcji ziarnowej,
- α_{ijk} — współczynnik (liczba) rozdziału,
- $c_{k,t}$ — współczynnik określony w równaniu (2.3),
- γ_{ijk} — udział *i-tej* gęstościowej i *j-tej* ziarnowej frakcji w produkcie *k-tej* operacji,
- N_k — liczba operacji jednostkowych,
- N_T — liczba różnych dróg przejścia frakcji równa liczbie operacji mieszania,

Udziały (wychody) $\Gamma_k^{(1,2)}$ wyjściowych strumieni *k-tego* urządzenia:

where:

- γ_{ij} — yield of *i-th* density and *j-th* size fraction in the feed,
- α_{ijk} — partition coefficient,
- $c_{k,t}$ — coefficient defined by eq.3,
- γ_{ijk} — yield of *i-th* density and *j-th* size fraction in the output product of *k-th* unit,
- N_k — number of unit operations,
- N_T — number of different fraction paths equal to the number of blending operations.

Yields $\Gamma_k^{(1,2)}$ of the output streams of the *k-th* unit:

$$\Gamma_k^{(1,2)} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \gamma_{ijk}^{(1,2)} \quad (4)$$

Parametry jakościowe (zawartości popiołu) $\Lambda_k^{(1,2)}$ w strumieniach wyjściowych k -tej operacji:

Quality parameters (ash contents) $\Lambda_k^{(1,2)}$ of the output streams from the k -th unit:

$$\Lambda_k^{(1,2)} = \Gamma_k^{(1,2)-1} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \lambda_{ij} \cdot \gamma_{ijk} \quad (5)$$

gdzie:

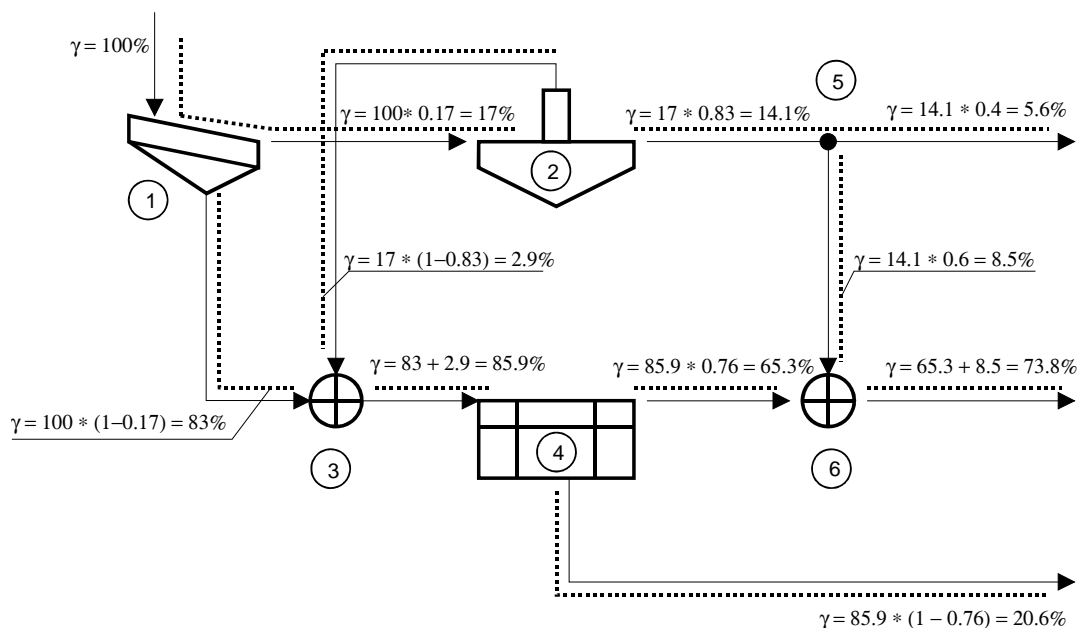
λ_{ijk} — parametr jakościowy (zawartość popiołu) i -tej gęstościowej i j -tej ziarnowej elementarnej frakcji węgla.

Wychody Γ_p i zawartości popiołu Λ_p produktów końcowych mogą być obliczone z równań (4) i (5) dla k równego numerowi ostatniej operacji jednostkowej w procesie. Ponieważ współczynniki rozdziału α_{ijk} w równaniach (1) i (2) są funkcjami parametrów rozdziału $P_{1...k}$ poszczególnych operacji jednostkowych, więc wychody $\Gamma_k^{(1,2)}$ i zawartości popiołu $\Lambda_k^{(1,2)}$ produktów końcowych są również funkcjami tych parametrów. Przykład przepływu frakcji elementarnej węgla przez układ technologiczny pokazany jest na rys. 2.

where:

λ_{ijk} — quality attribute (ash) of the i -th density and j -th size elementary coal fraction.

Yields Γ_p and ash contents Λ_p of output products from the plant can be calculated from equations (4) and (5) for k equal to the number of the last unit operation in the process. Partition coefficients α_{ijk} in equations (1) and (2) are functions of separation parameters $P_{1...k}$ of unit processes, so yields $\Gamma_k^{(1,2)}$ and ash contents $\Lambda_k^{(1,2)}$ of output products are also functions of those parameters. Illustration of the flow of the elementary fraction through the technological layout is shown in Fig. 2.



Rys. 2
Przepływ elementarnej frakcji nadawy w układzie technologicznym

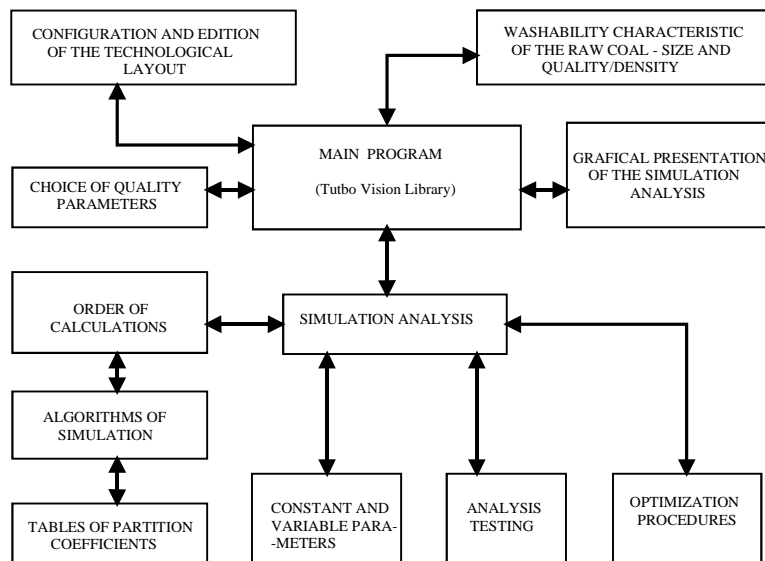
Fig. 2
Flow of the elementary feed fraction through the technological scheme

Struktura programu symulacyjnego przedstawiona jest na rys. 3. Program symulacyjny oprócz kompleksowej analizy układu technologicznego umożliwia optymalizację działania układu technologicznego w sensie maksymalnego osiąganego zysku. Procedury optymalizacyjne wykorzystują funkcję

The structure of the simulation program is shown in Fig. 3. Besides complex analysis of technological layout the simulation program allows to optimise coal processing results in terms of maximum yield of the desired quality products or in terms of maximum profit of a plant operation. The

kary łącznie z wybranym kryterium oceny przebiegu procesu.

optimisation procedures use the penalty function together with the chosen criterion of evaluation.



Rys. 3
Struktura programu symulacyjnego „Syptom”

Fig.3
The structure of the simulation program “Syptom”

Wartość sprzedanych produktów wynosi:

Profit from the sale of output products:

$$V_p(P_1, P_2, \dots, P_N) = \sum_{l=1}^{N_l} \Gamma_{p_l}(P_1, P_2, \dots, P_N) \cdot C_l - \sum_{m=1}^{N_m} \Gamma_{o_m}(P_1, P_2, \dots, P_N) \cdot K_o \quad (6)$$

gdzie:

- V_p — wartość produkcji,
- P_1, P_2, \dots, P_N — wektor parametrów rozdziału (gęstości rozdziału, proporcje składników),
- N — liczba zmiennych decyzyjnych,
- l — l -ty produkt handlowy,
- N_l — numer produktu handlowego,
- Γ_{p_l} — wychód l -tego produktu handlowego,
- C_l — cena jednostkowa l -tego produktu,
- Γ_{o_m} — wychód m -tego strumienia odpadów,
- K_o — koszt magazynowania i utylizacji odpadów,

Optymalizowana (minimalizowana) jest funkcja:

where:

- V_p — profit from the sale of output products,
- P_1, P_2, \dots, P_N — vector of separation parameters (densities of separation, proportions of products),
- N — number of decision variables,
- l — l -th saleable product,
- N_l — number of saleable products,
- Γ_{p_l} — yield of l -th saleable product,
- C_l — unit price of l -th product,
- Γ_{o_m} — yield of m -th stream of refuse,
- K_o — cost of refuse storage and processing,

Optimised (minimised) function is as follows:

$$F(P_1, P_2, \dots, P_N) = V_p(P_1, P_2, \dots, P_N) - \sum_{l=1}^{N_l} K_l(\Lambda_l) \quad (7)$$

gdzie:

where:

$$K_l(\Lambda_l) = \begin{cases} 0 & \text{for } \Lambda_{l_{\min}} \leq \Lambda_l \leq \Lambda_{l_{\max}} \\ w_l \cdot (\Lambda_{l_{\min}} - \Lambda_l) & \text{for } \Lambda_l \leq \Lambda_{l_{\min}} \\ w_l \cdot (\Lambda_l - \Lambda_{l_{\max}}) & \text{for } \Lambda_l \geq \Lambda_{l_{\max}} \end{cases} \quad (8)$$

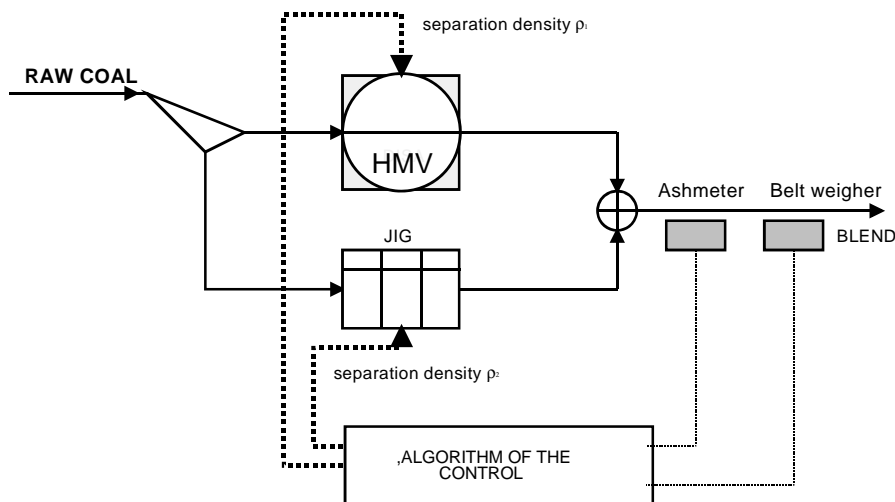
- $K_l(\Lambda_l)$ — funkcja kary dla parametru jakości Λ_l ,
- w_l — współczynnik wagi.

- $K_l(\Lambda_l)$ — penalty function for quality parameter Λ_l ,
- w_l — weight coefficient.

W wyniku procedury optymalizacyjnej — minimalizacja funkcji (7) — uzyskuje się wartości optymalnych parametrów systemu ($P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*$). Ocena struktury całego układu sterowania zakładu wzbogacania jest również możliwa z zastosowaniem modelu symulacyjnego.

3. Przykłady symulacji statycznej

Przykład prostego układu technologicznego dwóch wzbogacalników pracujących równolegle przedstawiony jest na rys. 4. Węgiel jest wzbogacany we wzbogacalniku zawieszinowym i w osadzarce. Lokalny układ automatyki umożliwia operatorowi dostosowanie zadanych wartości gęstości rozdziału przez zmiany gęstości cieczy ciężkiej oraz przez zmianę pozycji pływaka (w osadzarce) wpływającej na wielkość odbioru odpadów. W przypadku osadzarki gęstość rozdziału jest znana jedynie pośrednio, niemniej może ona być łatwo zmieniana. Koncentraty węgla grubego i miału są ze sobą łączone dając końcowy produkt o jakości (cenie) stosownie do warunków kontraktu pomiędzy producentem i odbiorcą. Końcowy produkt o zadanej jakości (zawartości popiołu) może być produkowany przy różnych parach gęstości rozdziału obu procesów, jednak takich aby połączenie obu składników dawało produkt o zadanej jakości. Analiza symulacyjna pokazuje, że obiekt ma charakterystykę ekstremalną, co oznacza, że istnieje optymalna kombinacja gęstości rozdziału, która daje maksymalną ilość mieszanki o zadanej zawartości popiołu zapewniając wobec tego maksymalną wartość produktu.



Rys. 4
Dwa wzbogacalniki pracujące równolegle

Fig. 4
Two washers working in parallel

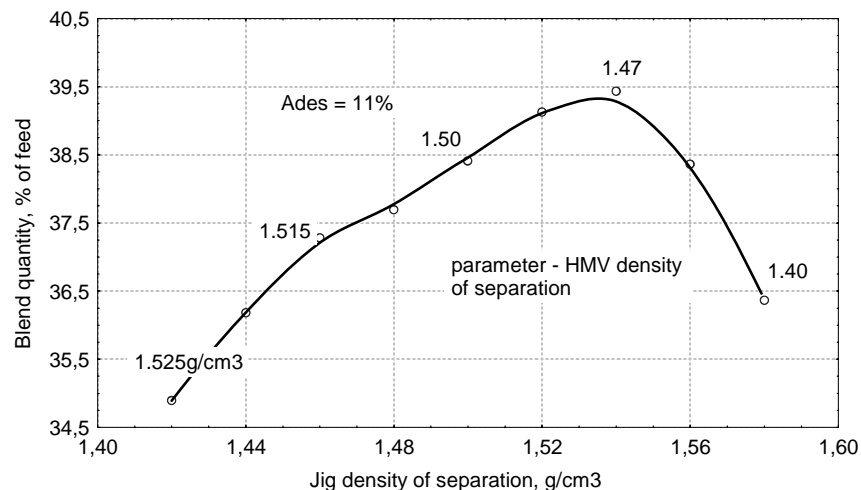
Zależność pomiędzy ilością mieszanki i gęstościami rozdziału cieczy ciężkiej i osadzarki (dla tej samej zawartości popiołu w mieszance) przedstawiono na rys. 5.

As a result of the optimisation procedure — minimisation of the function (8) — the optimal parameters of the system $P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*$ (separation densities, proportions of streams) are determined. Evaluation of the structure of the control system for the whole plant is also possible.

3. Examples of static simulation

An example of a simple technological system of two washers working in parallel is shown in Fig. 4. Coal is washed in heavy media process and in jigs. Local control systems enable the operator to adjust the desired values of coal separation densities by changing the heavy media densities or the float position (in the jig), which influences refuse discharge. The density of separation is known only indirectly in the latter case, nevertheless it can be easily changed. Concentrates of coarse and fine coals are blended together to produce the final product of expected quality (price) according to the terms of the contract between the producer and the client. The final product of the desired quality (ash content) can be produced for various set values of the densities of separation in both processes so that the blending of two components would give a product of the desired quality. The simulation analysis shows that the system has the extreme characteristics, which means that there exists the optimal combination of the densities of separation which gives the maximum amount of the blend of desired ash content or the maximum value of the product.

The simulated relation between the yield of the final concentrate and the separation densities of the heavy media bath and the jig (for the same ash content) is shown in Fig. 5.



Rys. 5
Ekstremalna charakterystyka statyczna układu z rys. 4.

Fig. 5
Extreme static characteristic of the system from Fig. 4

Charakterystyka ma ekstremum dla pewnej pary gęstości rozdziału ρ_1^{opt} i ρ_2^{opt} , które są optymalnymi gęstościami rozdziału maksymalizującymi ilość mieszanki o zadanej zawartości popiołu. Położenie ekstremum Q_{max} zależy od charakterystyki wzbogacalności węgla surowego i od krzywej rozdziału wzbogacalnika. Analiza kształtu funkcji $Q = Q(\rho_1, \rho_2)$ pokazuje, że istnieje tylko jedno ekstremum globalne, co ułatwia ustalenie algorytmu poszukującego położenie tego punktu. Nachylenie charakterystyki w pobliżu ekstremum jest dobrym kryterium oceny, czy poszukiwanie ekstremum da istotne efekty ekonomiczne.

Różnica pomiędzy wychodem mieszanki w ekstremum charakterystyki i wychodem mieszanki dla równych gęstości rozdziału w obu wzbogacalnikach $\rho_1 = \rho_2 = 1,50 \text{ g/cm}^3$ (dla których zawartość popiołu w mieszance również ma wartość $A = 11\%$) wynosi $\Delta Q = 3,66\%$ (w stosunku do 100% wychodu całej mieszanki). Ten przykład pokazuje, że praca układu technologicznego w pobliżu optymalnego punktu pracy może dawać istotne efekty ekonomiczne w porównaniu do, zwykle przypadkowo (lub zwyczajowo) wybranego punktu pracy.

Przykład analizy strategii sterowania złożonego układu technologicznego przedstawiony jest na rys. 6. Węgiel surowy wzbogacany jest w trzech wzbogacalnikach z cieczą ciężką HMV1,2,3, w wodnym hydrocyklonie WOC i we flotacji. Należy zauważyć, że proces flotacji nie może być traktowany identycznie w modelu symulacyjnym jak procesy wzbogacania grawitacyjnego. W rozważanym przypadku proces flotacji jest modelowany przez tablicę wychodów koncentratu i odpowiadającym im zawartościom popiołu. Podstawowym zadaniem jest maksymalizacja zysku zakładu stosownie do przyjętych kryteriów oceny ilości produktów i ich cen (dwa koncentraty Γ_1 i Γ_2 oraz mieszanka Γ_3). Kryterium maksymalizacji

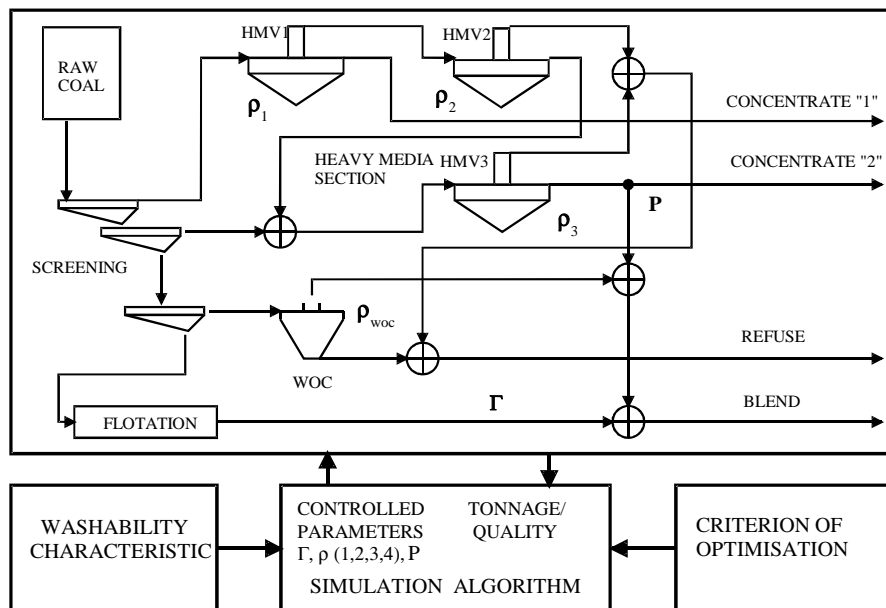
The curve has an extreme point for a certain pair of separation densities ρ_1^{opt} , ρ_2^{opt} , which we will call the optimal separation densities maximising the yield of the blend of the desired ash content. The location of the maximum yield point Q_{max} depends on the washability characteristics of raw coal and on partition curve of the separation unit. The analysis of the shape of the function $Q=Q(\rho_1, \rho_2)$ shows that this function has only one global extreme point which makes it easier to propose algorithms searching for this point. The slope of the surface in the vicinity of the extreme point is a good indication if the search for this point will bring noticeable economic benefits.

The difference between blend yields in the maximum point and, for instance for equal separation densities $\rho_1 = \rho_2 = 1.50$ (for which the desired ash content is also $A = 11\%$) is $\Delta Q = 3.66\%$ (in relation to 100% of the final product). This example shows that the operation of the technological system close to the optimum point can bring significant economic benefits in comparison to the usually "by chance" chosen point of operation.

An example of the control strategy for a complex technological process is shown in Fig.6. Raw coal is processed in three heavy media vessels HMV1,2,3, in water only cyclone WOC and in flotation. It has to be noted that the flotation process cannot be treated in the simulation model in the same way as the gravitational processes. The flotation process is represented here by the table of yields and corresponding ash contents in froth flotation concentrate. The basic task of the system is to maximise profit of the plant according to the accepted criterion in cluding yields of products and their prices (two concentrates Γ_1 , Γ_2 , and the blend Γ_3). The criterion of optimisation is the maximum profit from the whole production (7) at desired ash contents in two

jest w naszym przypadku maksimum zysku osiąganego z całej produkcji (7) przy zadanych zawartościach popiołu w dwóch koncentratkach. W układzie technologicznym jest pięć parametrów, które mogą być dobierane stosownie w zależności od rezultatów działania układu: gęstości rozdziału trzech wzbogacalników zawieszinowych (ρ_1, ρ_2, ρ_3), ilość flotokonzentratu Γ_f i proporcja koncentratu dodawanego do mieszanki (P). Parametry te są określane w modelu symulacyjnym z uwzględnieniem średniej charakterystyki wzbogalności węgla surowego, pomiarów wychodu i zawartości popiołu w produktach oraz stosowanego kryterium optymalizacji.

concentrates. In the system there are five parameters which can be controlled according to the results of plant operation: densities of separation of the three heavy media vessels (ρ_1, ρ_2, ρ_3), amount of froth flotation concentrate Γ_f and proportion of concentrate added to the blend (P). These parameters are evaluated in the simulation model on the basis of average washability characteristic of the raw coal, measurements of tonnage and ash contents of products and applied criterion of optimisation.



Rys. 6
Przykład złożonego układu technologicznego

Fig. 6
The example of a complex technological system

Kryteria optymalizacji były następujące:

- zadana zawartość popiołu w koncentracie „1”:
7 – 8%,
- zadana zawartość popiołu w koncentracie „2”:
10 – 11%,
- koszt magazynowania odpadów: stały
- zawartość popiołu w mieszance: wynikający z procedury symulacyjnej.

Celem procedury optymalizacyjnej była maksymalizacja zysku ze sprzedaży koncentratów „1” i „2” oraz mieszanki. Uzyskano następujące optymalne parametry rozdziału:

- gęstość rozdziału ρ_1 : 1,374 g/cm³
- gęstość rozdziału ρ_2 : 1,797 g/cm³
- gęstość rozdziału ρ_3 : 1,473 g/cm³
- gęstość rozdziału ρ_{woc} : 1,936 g/cm³
- względny wychód flotokonzentratu Γ_f : 80,5%
- proporcja koncentratu do mieszanki P: 26,9%.

The criterion of optimisation was as follows:

- desired ash content in concentrate „1”: 7 – 8% of ash,
- desired ash content in concentrate „2”: 10 – 11% of ash,
- costs of refuse storage: constant
- ash content in the blend: resulting from the simulation.

The aim of optimisation procedure was to maximise the profit from the sale of two concentrates („1” and „2”) and the blend. As a result of the optimisation procedure the following optimal parameters of separation have been found:

- density of separation ρ_1 : 1.374 g/cm³
- density of separation ρ_2 : 1.797 g/cm³
- density of separation ρ_3 : 1.473 g/cm³
- density of separation ρ_{woc} : 1.936 g/cm³
- relative yield of froth flotation Γ_f : 80.5%
- proportion of the concentrate P: 26.9%

4. Dynamiczny model symulacyjny

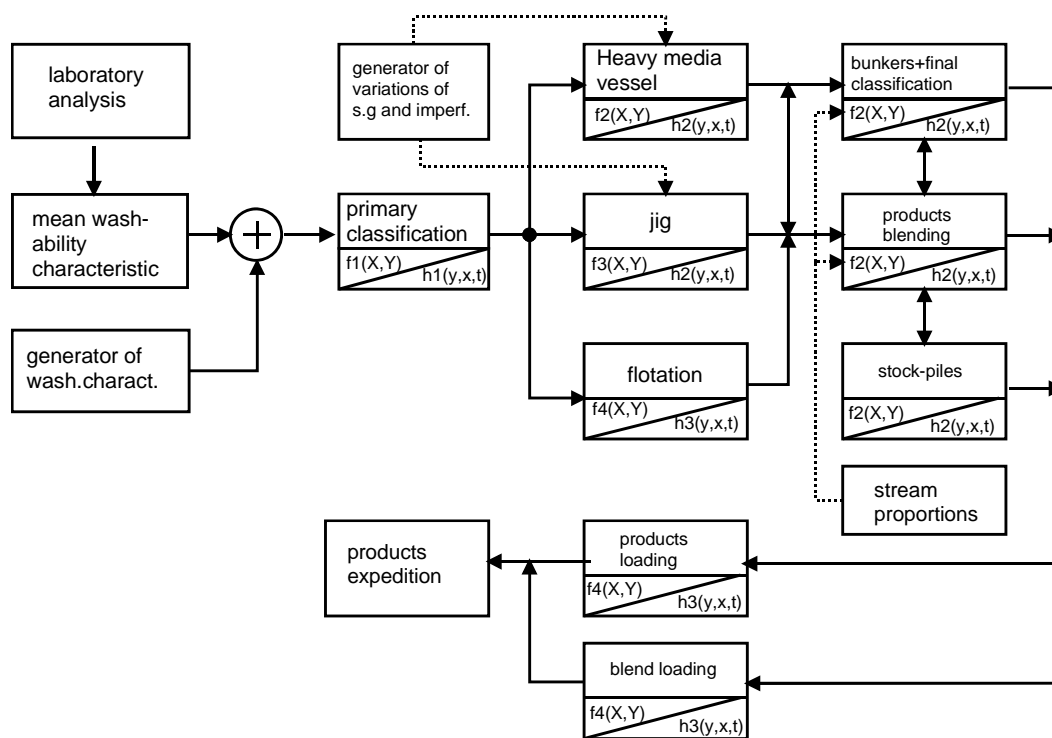
Stosunkowo mało prac badawczych było publikowanych na temat symulacji dynamicznej przebiegu procesów wzbogacania węgla, dotyczyły one głównie pojedynczych procesów jak flotacji, obiegów cieczy ciężkiej, osadzarek lub produkcji mieszanek węgla [5, 8]. Komputerowa symulacja przebiegu dynamicznego pracy całego zakładu wzbogacania może okazać się dobrym narzędziem do analizowania stanów przejściowych w procesie produkcyjnym, predykcji stanów alarmowych (przeciążenia) lub lepszego projektowania systemów sterowania. Dla celów dynamicznej analizy procesów wzbogacania węgla zostało opracowane oprogramowanie symulacyjne („Syrom-Dynamic”). Struktura tego oprogramowania została przedstawiona na rys. 7, a jego najważniejsze cechy są następujące:

- modułowa struktura umożliwiająca łatwą konfigurację skomplikowanego układu technologicznego,
- moduły programu zawierają procedury symulacyjne wzbogalników grawitacyjnych (wzbogalniki zawieszinowe, osadzarki, cyklony), flotacji, przesiewaczy, przenośników taśmowych, zbiorników, mieszalników, rozdzielaczy strumieni, załadunku,
- każdy moduł opisany jest przez odpowiednią charakterystykę statyczną i dynamiczną,
- model symulacyjny został opracowany z zastosowaniem oprogramowania Matlab(Simulink).

4. Dynamic simulation

Simulation of the dynamics of coal preparation plants has been so far discussed in few papers, and concentrated basically on individual processes such as flotation, heavy media circuit, jigs or coal blending [5, 8]. Computer simulation of the dynamics of the whole preparation plant can appear to be a good tool to analyse transient states in complex technological systems, to predict emergency states in the plant (overload) or to improve the design of control systems. The software package (“Syrom-Dynamic”) has been developed for dynamic simulation of coal preparation processes. Structure of the software package is shown in Fig.7 and has the following features:

- modular structure which allows to easily configure complicated technological schemes,
- software modules comprise such objects as: gravitational washers (heavy media, jigs, cyclones), flotation, screens, belt conveyors, bunkers, coal blending, stream splitting and product loading,
- each unit block is described by the static and dynamic characteristics,
- basic software has been developed using Matlab(Simulink) software package.



Rys. 7
Struktura dynamicznego programu symulacyjnego „Syrom-Dynamic”

Fig. 7
The structure of the dynamic simulation software package “Syrom-Dynamic”

Model charakterystyki wzbogalności węgla

surowego

Charakterystyka wzbogalności węgla surowego określona jest przez procentowe udziały wychodów w_i frakcji gęstościowych r_i w nadawie oraz przez liniową zależność pomiędzy zawartością popiołu a_i i gęstością r_i tych frakcji. W przypadku stosowania przesiewania węgla surowego powyższa charakterystyka powinna zostać podana dla każdej klasy ziarnowej nadawy. Charakterystyka wzbogalności węgla surowego (dla danej frakcji ziarnowej lub uogólniona dla całej nadawy) jest podana przez wektor $W(w_i, r_i, a_i)$. Zakłada się, że zawartość popiołu w poszczególnych frakcjach jest w przybliżeniu stała dla danego typu węgla surowego a zmiany wychodu poszczególnych frakcji są opisane przy pomocy procesu stochastycznego:

$$w_i(t) = w_{i0} + \Delta w_i(t) \quad (9)$$

gdzie:

- w_{i0} – średnia wartość wychodu frakcji,
- $\Delta w_i(t)$ – zakłócenie stochastyczne (wartość średnia = 0 a wariancja $\sigma^2[w_i]$).

Wzbogalnik grawitacyjny (wzbogalnik zawieszinowy lub osadzarka)

Model wzbogalnika grawitacyjnego opisany jest charakterystyką statyczną i dynamiczną. Charakterystyka statyczna jest zależnością pomiędzy sygnałami wyjściowymi (ilość i zawartość popiołu w produktach) i wejściowymi lub sterującymi (gęstości rozdziału, charakterystyka wzbogalności, imperfekcja). Charakterystyka statyczna jest określona np. równaniami (4, 5) dla parametrów koncentratu. Własności dynamiczne wzbogalnika grawitacyjnego opisane mogą być, na podstawie badań przemysłowych, w postaci elementu liniowego pierwszego rzędu (stała czasowa T_i) z opóźnieniem transportowym (τ_i). Dla koncentratu statyczne i dynamiczne charakterystyki są określone równaniami (10) (Funkcje przejścia Laplace'a):

$$Q_c(s) = \frac{Q_k(r) \cdot e^{-s\tau_{01}}}{1+sT_1} \cdot r(s)$$
$$A_c(s) = \frac{A_k(r) \cdot e^{-s\tau_{02}}}{1+sT_2} \cdot r(s) \quad (10)$$
$$Q_c(s) = \frac{Q_k(r) \cdot e^{-s\tau_{03}}}{1+sT_3} \cdot Q_n(s)$$

gdzie:

- $\tau_{01,02,03}$ – opóźnienia transportowe sygnałów $r(t)$ i $Q_n(t)$ (gęstość rozdziału, ilość węgla surowego),
- $T_{1,2,3}$ – stałe czasowe dla sygnałów $r(t)$ i $Q_n(t)$.

Model of the raw coal washability characteristics

Washability characteristics of raw coal is determined by percentage yields w_i of density fractions r_i in the feed and a linear relation between ash contents a_i in fractions and their densities r_i . In the case of raw coal screening, such characteristics should be determined for size fractions of the feed. The washability characteristics of raw coal (for a particular size fraction or overall size fraction) is determined by the vector $W(w_i, r_i, a_i)$. It is assumed that ash contents in density fractions are approximately constant for a given raw coal and variations of yields of fractions are stochastic functions of time:

where:

- w_{i0} – mean value of the fraction yield,
- $\Delta w_i(t)$ – stochastic noise (mean value = 0 and variance $\sigma^2[w_i]$).

Gravitational washer (heavy media bath or jig)

The model of the gravitational washer consists of the static characteristics and dynamic characteristics. Static characteristics is the relation between output signals (yields and ash contents in products) and input or control parameters (densities of separation, washability characteristics, imperfection). The static characteristics is given for example by the equations (4, 5) for concentrate parameters. Dynamics of the gravitational washer has been described on the basis of field tests as the first order element (time constant T_i) with time (transport) delay (τ_i). For the concentrate the static and dynamic characteristics are given by the equation (10) (Laplace transfer functions):

where:

- $\tau_{01,02,03}$ – transport delays for signals $r(t)$ and $Q_n(t)$ (density of separation, tonnage of raw coal),
- $T_{1,2,3}$ – time constants for signals $r(t)$ and $Q_n(t)$.

Zbiornik węgla i przenośnik taśmowy

Masę produktu $M_z(t)$ zmagazynowanego w chwili t w zbiorniku można obliczyć jako całkę z różnicy natężeń przepływu węgla doprowadzonego i wyprawzonego ze zbiornika:

$$M_z(t) = \int_0^t (Q_{in}(t) - Q_{out}(t)) dt = m$$

$$M_z(t) = 0 \quad \text{dla} \quad m \leq 0$$
(11)

Pojedynczy zbiornik z jednym wylotem można traktować [3] jako dolno przepustowy filtr (z czasem uśredniania T) dla zmian zawartości popiołu w produkcie opuszczającym zbiornik $A_{out}(t)$:

$$A_{out}(t) \approx \frac{1}{Q_T} \cdot \int_t^{t+T} A_{in}(t) \cdot Q_{in}(t) dt$$
(12)

Przenośnik taśmowy jest elementem proporcjonalnym z transportowym czasem opóźnienia T_0 i jego funkcja przejścia (transformata Laplace'a) jest następująca:

$$Q_{out}(s) = e^{-sT_0} \cdot Q_{in}(s)$$

$$A_{out}(s) = e^{-sT_0} \cdot A_{in}(s)$$
(13)

5. Przykład dynamicznej symulacji układu technologicznego

Przykład prostego układu produkcji mieszanki węgla, którego działanie w funkcji czasu było symulowane z zastosowaniem przedstawionego symulatora pokazano na rys.8.

Coal bunker and belt conveyor

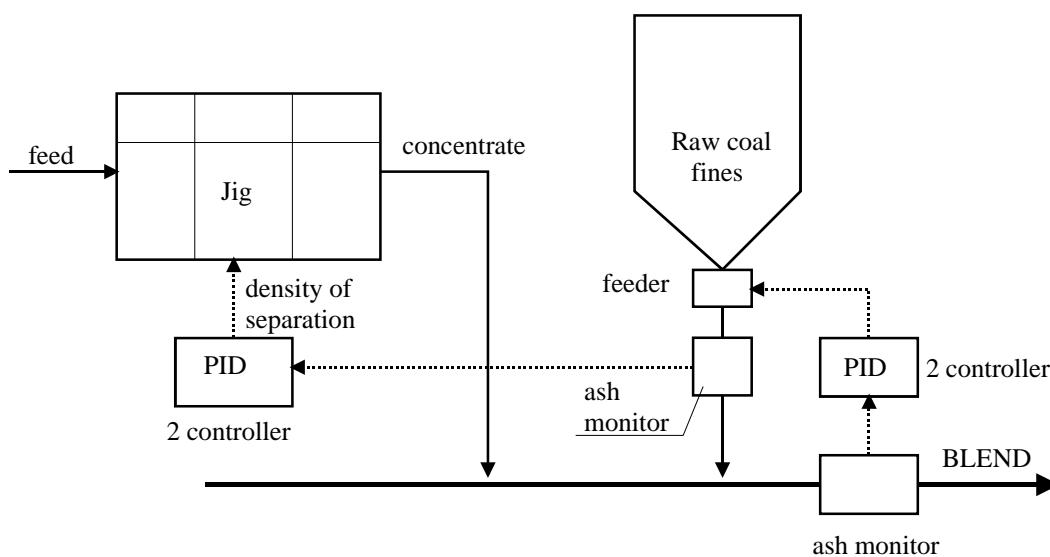
The mass of product $M_z(t)$ stored in a bunker can be calculated as an integral of the difference between input $Q_{in}(t)$ and output $Q_{out}(t)$ product tonnage streams:

The single bunker with one outlet can be treated [3] as a low pass filter (with time of averaging T) for variations of ash content in the output product $A_{out}(t)$, hence:

The belt conveyor is a proportional unit with time (transport) delay T_0 and its transfer (Laplace) function is:

5. An example of a dynamic simulation of a technological system

An example of the simple coal blending system whose operation with time has been simulated with the use of the above simulator is shown in Fig.8.

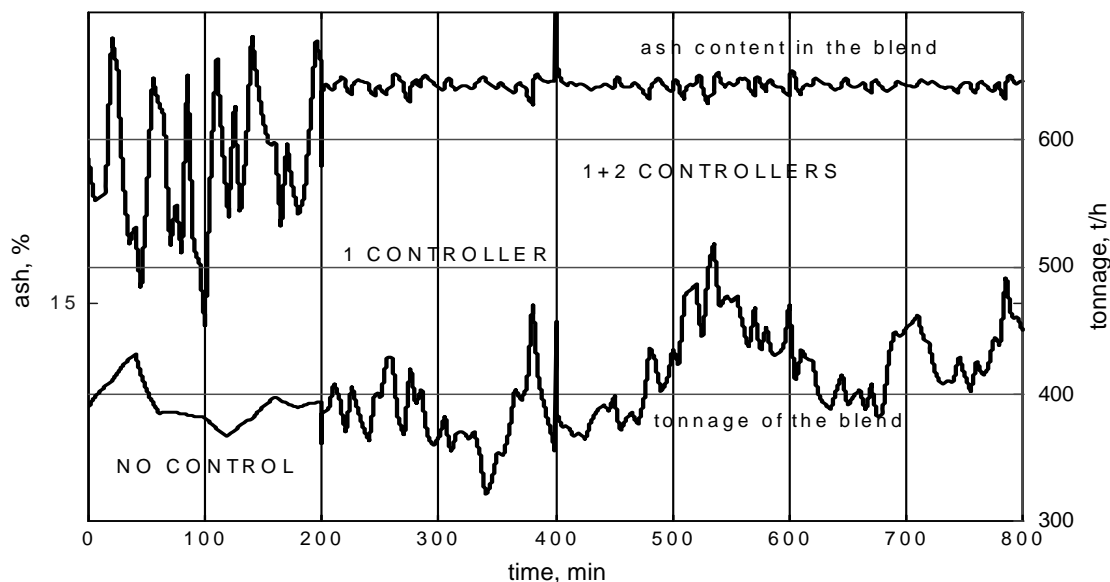


Rys. 8
Układ produkcji mieszanki węgla

Fig. 8
The coal blending system

Koncentrat z osadzarki jest łączony ze strugą miazła węgla surowego dając końcowy produkt dla elektrowni. Działanie układu jest zakłócanie fluktuacjami natężenia przepływu nadawy do osadzarki, zmianami gęstości rozdziału i zawartości popiołu w węglu surowym. W pętli sterowania zastosowano dwa popiołomierze radiometryczne. Zmiany powyższych parametrów powodują wystąpienie zmian zawartości popiołu w mieszance. Sygnał z pierwszego popiołomierza jest porównywany z wartością zadaną zawartości popiołu w mieszance a sygnał błędu stabilizuje zawartość popiołu w mieszance poprzez dostosowanie odpowiedniego natężenia przepływu miazła surowego. Sygnał z drugiego popiołomierza wpływa na gęstość rozdziału osadzarki optymalizując jednocześnie natężenie przepływu mieszanki. Działanie układu bez automatycznego sterowania, z włączoną pierwszą pętlą sterowania oraz z dwoma pętlami sterowania przedstawiono na rys. 9.

The concentrate from the jig is blended with raw fines to produce final product for a power station. The operation of the system is disturbed by variations of tonnage of the feed to the jig, variations in density of separation and ash content in raw fines. Variations in the above parameters result in variations in the ash content in the blend. Two on-line ash monitors are applied in control loops. The signal from the first monitor is compared with the desired value of the ash content in the blend and the difference signal controls tonnage of raw fines to stabilise the quality of the blend. The signal from the second monitor influences the density of separation of the jig (cut-point) to optimise at the same time the tonnage of the blend. The operation of the system without automatic control, with the first loop closed and with both control loops closed, is shown in Fig. 9.



Rys. 9
Symulacja działania układu produkcji mieszanki węgla z układem automatycznego sterowania i bez tego układu

Fig. 9
Simulation of the operation of the coal blending system with and without automatic control

Model symulacyjny umożliwia badanie układu w warunkach dynamicznych, optymalizowanie struktury układu sterowania oraz pozwala na optymalny dobór parametrów regulacji. Model symulacyjny może być również zastosowany do badania wpływu parametrów technologicznych (jak na przykład opóźnień transportowych, bezwładności układu maszynowego lub zakłóceń nadawy lub załadunku) na zachowanie się całego układu.

Fluktuacje zawartości popiołu w węglu surowym oraz gęstości rozdziału osadzarki powodują powstanie znacznych fluktuacji zawartości popiołu i natężenia przepływu mieszanki w pierwszym okresie

The simulation model allows to test the operation of the system in dynamic conditions, to optimise the structure of the system and to choose optimal parameters of control loops. Also the influence of the technological parameters such as transport delays, inertia of the machinery or disturbances in the feed or product loading can be tested with the use of the simulation model on the performance of the whole system.

Fluctuations of ash content in raw fines from the bunker and fluctuations of the density of separation of the jig result in fluctuations of the ash content and tonnage of the blend as it is shown in Fig. 9 during

bez automatycznego sterowania jak to pokazano na rys. 9. Następny przedział czasu pokazuje efekty stabilizacji zawartości popiołu po włączeniu pierwszej pętli sterowania. Trzeci okres pokazuje działanie systemu po włączeniu drugiego regulatora. W tym przypadku można zaobserwować (zgodnie z analizą teoretyczną), że przy tej samej stabilizowanej zawartości popiołu w mieszance można uzyskać zwiększenie średniej wydajności (ilości) produkowanej mieszanki.

6. Wnioski

Metody symulacji komputerowej są wygodnym narzędziem dla projektowania i oceny procesów wzbogacania węgla. Metody te nie są dotąd powszechnie stosowane, ponieważ trudno jest precyzyjnie modelować działanie układu w warunkach zmienności charakterystyk nadawy. Modele statyczne umożliwiają prognozowanie efektów działania procesów technologicznych i wybór optymalnej strategii sterowania całego zakładu wzbogacania. Modele dynamiczne umożliwiają badanie działania układu sterowania w funkcji czasu. Pozwalają one również na optymalizację dynamiczną parametrów ilościowych i jakościowych produktów. Wyniki symulacji przedstawione w artykule będą w dalszym ciągu weryfikowane danymi z planowanych dalszych badań układów przemysłowych.

the first period of simulation without any control. The second period shows the effects of ash content stabilisation after the first (1) controller has been switched on. The third period shows the operation of the system after the second (2) controller is switched on. In this case it can be observed (according to the theory) that for the same value of stabilised ash content in the blend the higher mean tonnage of the blend can be produced by the system.

6. Conclusions

Computer simulation is a convenient tool for designing and evaluating coal preparation processes. This is not widely used so far, because the operations, and the variability in feed characteristics make the process difficult to model in a precise way. Static (steady state) models enable determination of expected results of coal processing and selection of an optimal strategy of the control of the whole plant. Dynamic models enable to predict operation of on-line control systems. Tonnage and quality of products optimisation can also be tested using dynamic simulation algorithms. The simulation results presented in this paper should be evidenced by data observed in a practical system.

Literatura — References

1. Arnold, B. J., Gallier P. W.: *Using coal cleaning simulators to optimise clean coal production. Proceedings of the 11th International coal Preparation Conference, Lexington K.Y., 1994.*
2. Cierpisz, S., Pielot J.: *Problems of the extreme control of coal preparation processes. Proceedings of the 4th APPMK Conference, 6-8 May, Szczyrk, Poland, 1998*
3. Cierpisz S., Pielot J.: *Computer simulation of complex control systems in coal preparation plants. Archives of Mining Sciences, vol.44, 3, 1999.*
4. Clarkson C. J.: *A Model of Dense Medium Cyclones. Coal Preparation 1989 Vol. 7, N. 3-4, ss.159-174.*
5. Gordon R. Couch G., R.: *Coal preparation – automation and control. IEA Coal Reserach, 1996.*
6. Goodman F., McCreery J.: *Coal Preparation Computer Model. Vol.I. U.S. Environmental Protection Agency, Washigton 1980.*
7. Sinha A. K.: *Modelling the potential of a coal preparation plant. Colliery Guardian,238(9), 1990.*
8. Tavares L. M., King R. P.: *A Useful Model for the Calculation of the Performance of Batch and Continuous Jigs. Coal Preparation 1995 Vol. 15, N. 3-4, ss.99-128.*