

Zastosowanie analizy wrażliwości w sterowaniu nadrzędnym grupy zakładów przeróbki węgla

W artykule omówiono zagadnienia zastosowania analizy wrażliwości w sterowaniu nadrzędnym grupy zakładów przeróbki węgla. Przeprowadzono analizę wrażliwości, optymalnej struktury powiązań układu nadrzędnego, w obecności zakłóceń. Przedstawiono analizę wrażliwości parametrów systemu w otoczeniu optymalnego punktu pracy. Porównano wyniki takiej analizy dla kilku wybranych wariantów struktur technologicznych. Analizy przeprowadzono metodami symulacyjnymi. Zastosowano opis analityczny modeli statycznych układów technologicznych wzbogacania węgla oraz technikę metamodelowania do opracowania modelu całkowitego układu sterowania nadrzędnego grupy zakładów przeróbki węgla.

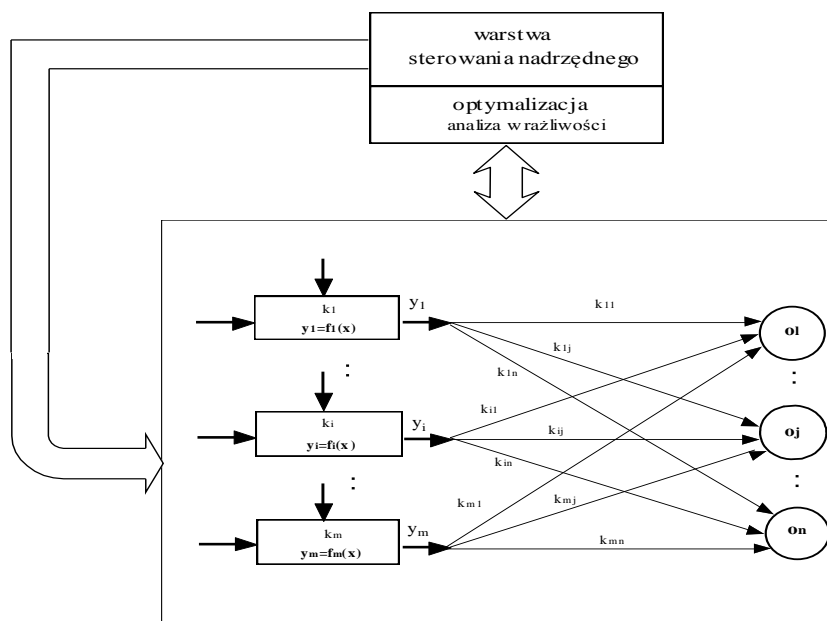
WSTĘP

Proces dostosowywania polskiego górnictwa węgla kamiennego do warunków gospodarki rynkowej spowodował przekształcenie struktury organizacyjnej przedsiębiorstw górniczych w podmioty gospodarcze obejmujące grupę kopalń, a tym samym grupę zakładów przeróbki węgla. Z punktu widzenia kontroli (sterowania) produkcji, powstały w ten sposób układ jest układem wielowarstwowym (hierarchicznym) składającym się z kilku podsystemów o określonych funkcjach celu y_i oraz zmiennych sterowalnych x_i dla i -tego podsystemu. Poglądowy schemat takiego nadrzędnego układu sterowania obejmującego kilka podsystemów (układów technologicznych przeróbki węgla) oraz jego powiązania k_{ij} z odbiorcami węgla o_j (o określonych dla każdego odbiorcy parametrach ilościowo-jakościowych produktów) przedstawiono na rys. 1.

Parametrami sterującymi w takim systemie są gęstości rozdziału w poszczególnych procesach wzbogacania oraz proporcje składników tworzących mieszanki energetyczne. Optymalizacja systemu polega na takim doborze parametrów rozdziału, aby maksymalizować efekty produkcyjne według przyjętego kryterium ekonomicznego (na przykład wartości lub ilości poszczególnych produktów).

Analiza sieci powiązań pomiędzy grupą zakładów przerobczych i odbiorców produktów węglowych pokazuje, że realizację zawartych umów można wykonać na wiele sposobów, dostosowując odpowiednio parametry ilościowo-jakościowe produktów jednego zakładu do odpowiednich parametrów produktów innych zakładów w rozpatrywanej grupie [1].

W sterowaniu optymalnym dąży się do punktu pracy zapewniającego maksymalną wartość wybranego wskaźnika jakości, scharakteryzowanego odpowiednio sformułowaną funkcją celu. Procesy wzbogacania są procesami nieliniowymi, charakterystyki węgla surowego znacząco się różnią dla poszczególnych kopalń i wykazują dużą zmienność, tym samym wartości ilościowo-jakościowe produktów mogą się znacznie różnić dla nastaw parametrów rozdziału w pobliżu optimum w stosunku do tych wyznaczonych dla optymalnego punktu pracy. Niezwykle istotne znaczenie dla optymalnego wykorzystania węgla surowego będzie zatem mieć dobór optymalnej struktury sterowania grupy zakładów przeróbki węgla (układów technologicznych), przy zmieniających się charakterystykach gęstościowo-jakościowych węgla surowego lub innych zakłóceniach wynikających na przykład z dokładności nastaw parametrów rozdziału.



Rys. 1. Schemat powiązań układu nadrzędnego przeróbki węgla

Z tego względu istotna jest znajomość zależności wiążących wybraną funkcję celu z tymi zmiennymi, które mogą być wykorzystane jako zmienne decyzyjne do celów nadrzędnej optymalizacji. Informacje dotyczące wpływu poszczególnych zmiennych sterowalnych na funkcję celu można uzyskać korzystając z *analizy wrażliwości* [3-5, 8-11].

1. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI W UKŁADZIE NADRZĘDNYM GRUPY KOPALŃ

W artykule przedstawiono wyniki analizy wrażliwości przeprowadzonej dla dwóch struktur technologicznych procesu wzbogacania: dwuproduktowego wzbogacania z boczną strugą węgla (*warianty A i B*), posobnego wzbogacania węgla (*wariant C*). Przyjęte do obliczeń modele tych układów technologicznych przedstawione są szczegółowo w monografii [2].

Analiza wrażliwości, dla struktury technologicznej wzbogacania dwuproduktowego z boczną strugą węgla, była przeprowadzona w trzech wariantach:

- *Wariant A* – dotyczył praktycznie zrealizowanego planu produkcji zgodnie z zawartymi umowami z odbiorcami produktów (przy nie optymalizowanych nastawach),
- *Wariant B1* – odnosi się do optymalnej struktury powiązań produkcyjnych, przy założeniu produkcji koncentratów o zawartości popiołu nie przekraczającej 10%,
- *Wariant B2* – uwzględnia optymalną strukturę powiązań produkcyjnych, przy dowolnej zawartości popiołu w koncentracie.

1.1. Kryterium optymalizacji przyjęte do obliczeń

Najbardziej ogólnym kryterium optymalizacji systemu grupy kopalń jest maksymalizacja wartości całej lub części produkcji jako sumy poszczególnych produktów. W pracy przedstawiono wyniki analizy przeprowadzonej dla przyjętego uproszczonego kryterium optymalizacyjnego w postaci:

$$Max\{M_k\} \tag{1}$$

przy uwzględnieniu warunków ograniczających na parametry ilościowe i jakościowe produktów:

$$M_m = M_{m_zad} \tag{2}$$

$$A_{m(k)} \leq A_{m(k)_zad} \tag{3}$$

gdzie:

- $M_{m(k),j}$ – masa mieszanki energetycznej (koncentratu) j -tego produktu, t,
- $A_{m(k),j}$ – zawartość popiołu j -tego produktu mieszanki (koncentratu), %.

1.2. Rozpatrywane warianty analizy wrażliwości

W celu określenia wpływu parametrów decyzyjnych układu na parametry wyjściowe układu nadrzędnego, w przeprowadzonej analizie, założono zmiany gęstości rozdziału w zakresie $\pm \Delta\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3$ w stosunku do optymalnego punktu pracy układu ($\rho = \rho_{opt} \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$). Analizę taką przeprowadzono dla trzech różnych grup nadaw oznaczonych jako N0 (podstawowa) oraz N1 i N2.

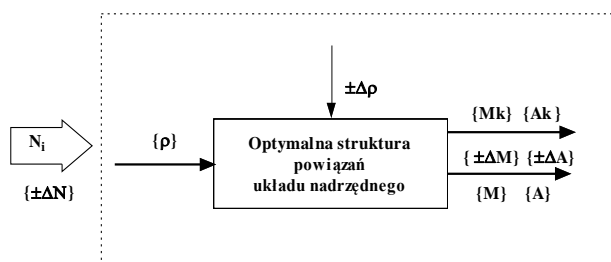
Dla nadaw N1 założono zwiększenie o 5% wychodu frakcji gęstościowych najlżejszych i jednocześnie zmniejszenie o 5% wychodu frakcji gęstościowych najcięższych w stosunku do nadaw wyjściowych N0. Dla grup nadaw N2 założono zwiększenie o 5% wychodu frakcji gęstościowych najcięższych i jednocześnie zmniejszenie o 5% wychodu frakcji gęstościowych najlżejszych w stosunku do nadawy wyjściowej. Dotyczyło to charakterystyk węgla surowego dla wszystkich rozpatrywanych kopalń.

Przeprowadzono także analizę wpływu zmian nadawy (traktowanych jako zakłócenia) na wartości parametrów ilościowo-jakościowych w strukturze optymalnych powiązań grupy kopalń – odbiorca. Dla optymalnych nastaw wyznaczonych przy określonej nadawie przeprowadzono obliczenia w przypadkach występowania zakłóceń wynikających ze zmiany charakterystyk węgla surowego. Rozpatrzone przypadki analizy przedstawia tabela 1.

Tabela 1
Rozpatrywane przypadki analizy wrażliwości

| | Nadawa N1 | Nadawa N0 | Nadawa N2 |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Optymalne parametry wyznaczone dla N1 | N1 | N10 | N12 |
| Optymalne parametry wyznaczone dla N0 | N01 | N0 | N02 |
| Optymalne parametry wyznaczone dla N2 | N02 | N20 | N2 |

Pozwoliło to określić modele wrażliwości uwzględniające dwa typy zakłóceń przedstawione poglądowo na rys. 2.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy układu nadzrędnego z zaznaczeniem analizowanych zakłóceń

2. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI OPTYMALNEJ STRUKTURY POWIĄZAŃ UKŁADU NADZRĘDNEGO

W celu określenia wpływu zmian nastaw parametrów rozdziału na wybrane funkcje celu przy

dowolnej kombinacji zmian tych parametrów w otoczeniu optymalnego punktu pracy, przeprowadzono analizę wrażliwości metodą statystyczną. Jedną z metod statystycznych umożliwiających wyznaczenie wskaźników wrażliwości jest metoda analizy regresji [7, 9, 10]. W metodzie tej przyjmuje się, że zależność wpływu wejść na wyjście układu określa model regresji $y = f(\beta_0, \dots, \beta_z, x_1, \dots, x_n)$. Model całkowity regresji zawiera oprócz składników liniowych składniki będące iloczynami zmiennych wejściowych. Zastosowana standaryzacja zmiennych, polegająca na zastąpieniu zmiennych rzeczywistych zmiennymi standaryzowanymi, sprowadza wartości poszczególnych zmiennych wejściowych do tego samego przedziału liczbowego [-1; 1].

Dla tak wyznaczonych parametrów β , na przykład dla zmiennej k , wskaźnik wrażliwości całkowitej S_{Tk} ma postać:

$$S_{Tk} = |\beta_k| + \sum_{l \neq k} |\beta_{kl}| + \sum_{\substack{m \neq k \\ m \neq l}} \sum_{l \neq k} |\beta_{klm}| + \dots \quad (4)$$

Wskaźniki $\beta_{kl}, \beta_{klm}, \dots$ są różne od zera jeżeli w układzie występują interakcje.

Dla rozpatrywanych wariantów A, B, C przeprowadzono analizę wrażliwości dla przypadku zmian nastaw parametrów gęstości rozdziału w stosunku do parametrów optymalnych. Przeprowadzona analiza dotyczyła wszystkich możliwych wariantów zmian w stosunku do optymalnego punktu pracy. Rozpatrzono więc przypadki zmian nastaw parametrów dla jednego wzbogacalnika jak i dla wszystkich równocześnie. Tym samym otrzymano $3^5 = 243$ punktów pracy systemu w otoczeniu optimum dla jednej analizy. Analizę wrażliwości przeprowadzono dla wszystkich przypadków przedstawionych w tabeli 1.

Istotnym aspektem mającym wpływ na jakość sterowania układu nadzrędnego grupy kopalń jest określenie wrażliwości parametrów produktów handlowych, otrzymanych dla optymalnych powiązań pomiędzy producentami węgla (zakładami przeróbki) a odbiorcami węgla, w zależności od zakłóceń nastaw gęstości rozdziału w otoczeniu optymalnego punktu pracy układu. Porównanie optymalnej struktury powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami (liczby więzów) dla poszczególnych wariantów, przy różnych nadawach, a liczbą wskaźników wrażliwości produktów handlowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2
Koncentracja powiązań w optymalnym punkcie pracy układu

| | STRUKTURA | A | B1 | B2 | C |
|----------------------|-----------|----|-------|------|------|
| $\Delta M_k, \%$ | NADAWA N0 | 0 | 8,2 | 15,9 | 18,6 |
| Powiązania optymalne | | 23 | 21 | 19 | 13 |
| Wrażliwość produktów | | 20 | 10 | 11 | 11 |
| $\Delta M_k, \%$ | NADAWA N1 | - | 33,4 | 37,7 | 41,2 |
| Powiązania optymalne | | - | 17 | 16 | 13 |
| Wrażliwość produktów | | - | 12 | 6 | 13 |
| $\Delta M_k, \%$ | NADAWA N2 | - | -19,1 | -7,9 | -4,1 |
| Powiązania optymalne | | - | 21 | 18 | 16 |
| Wrażliwość produktów | | - | 13 | 11 | 15 |

Tabela 3
Wskaźniki wrażliwości – Podsumowanie

| | A | | B1 | | B2 | | C | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nadawa | S_M | S_A | S_M | S_A | S_M | S_A | S_M | S_A |
| N1 | - | - | 4,5 | 5,5 | 6,0 | 22 | 15,2 | 59,8 |
| N0 | 5,6 | 3,7 | 5,6 | 7,3 | 18,8 | 52,6 | 26,8 | 77,0 |
| N2 | - | - | 8,7 | 9,6 | 28,8 | 83,0 | 31,1 | 100,0 |
| N1 | - | - | 4,5 | 5,5 | 6,0 | 22,0 | 15,2 | 59,8 |
| N10 | - | - | 5,4 | 7,1 | 7,0 | 22,2 | 23,9 | 85,4 |
| N12 | - | - | 6,3 | 6,7 | 7,2 | 19,4 | 19,7 | 61,2 |
| N01 | 4,9 | 5,2 | 4,8 | 8,2 | 15,9 | 56,3 | 21,2 | 84,1 |
| N0 | 5,6 | 3,7 | 5,6 | 7,3 | 18,8 | 52,6 | 26,8 | 77,0 |
| N02 | 6,3 | 2,4 | 6,5 | 6,6 | 20,8 | 54,6 | 28,4 | 88,9 |
| N21 | - | - | 5,9 | 10,6 | 20,7 | 82,1 | 22,9 | 93,8 |
| N20 | - | - | 7,3 | 10,6 | 24,6 | 83,3 | 26,8 | 98,7 |
| N2 | - | - | 8,7 | 9,6 | 28,8 | 83,0 | 31,1 | 100,0 |

Dla wszystkich rozpatrywanych nadaw największą koncentrację powiązań (najmniejszą ich liczbę) otrzymano w wariancie C. Jednak w tym wariancie, liczba produktów handlowych, których parametry są wrażliwe na zakłócenia optymalnych nastaw gęstości rozdziału jest największa. Najmniejszą liczbę produktów wrażliwych na zakłócenia, związane z nastawami gęstości rozdziału, otrzymano w wariancie B2.

W tabeli 3 przedstawiono porównanie wyników analizy wrażliwości, przeprowadzonej dla różnych struktur technologicznych, przy uwzględnieniu rozpatrywanych zakłóceń. Podane w tabeli wartości wskaźników wrażliwości wyznaczono sumując wskaźniki wrażliwości wszystkich produktów odbiorców O1-O7.

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 3 można zauważyć, że największe wartości współczynników wrażliwości otrzymano dla wariantu C i nieco mniejsze dla wariantu B2. Współczynniki wrażliwości dla wariantu B1 i A są znacznie mniejsze od pozostałych. Istnieje zatem korelacja pomiędzy wynikami uzyskanymi z obliczeń optymalizacyjnych (tabela 2) oraz analizy wrażliwości. Im większa wartość funkcji celu sterowania (ilości koncentratu na eksport) tym większa wrażliwość systemu na zakłócenia związane ze zmianą optymalnych wartości nastaw parametrów rozdziału.

Należy także zauważyć, że wskaźniki wrażliwości dotyczące zmian zawartości popiołu S_A są dużo większe niż wskaźniki S_M dotyczące zmian ilości (masy) produktów. Oznacza to, że produkty wzbogacania produkowane były przy wysokich gęstościach rozdziału.

Analizując współczynniki wrażliwości pod kątem wpływu parametrów rozdziału we wzbogacalnikach poszczególnych zakładów przeróbki węgla na produkty wzbogacania (tabela 4), można zauważyć, że największe wartości wskaźników wrażliwości występują dla produktów wyprodukowanych w zakładach K3 i K1.

PODSUMOWANIE

W pracy przeprowadzono analizę wrażliwości wielkości wejścia-wyjścia układu sterowania nadrzędnego grupą zakładów przeróbki węgla. Jako zmienne wyjściowe (funkcje celu) przyjęto parametry produktów handlowych. Zmiennymi wejściowymi w analizie były gęstości rozdziału wzbogacalników poszczególnych układów technologicznych zakładów przerobczych. Analiza wrażliwości dotyczyła zmian parametrów wyjściowych układu w otoczeniu optymalnego punktu pracy. W analizie uwzględniono także zakłócenia, wynikające ze zmian charakterystyk węgla surowego. Obliczenia przeprowadzono dla różnych struktur technologicznych (wariantów technologii produkcji).

Wybór struktury technologicznej w systemie sterowania grupą zakładów przeróbki węgla ma wpływ nie tylko na optymalne wartości funkcji celu sterowania, ale także na wrażliwość produktów na zmiany parametrów sterujących (odchyłki od optymalnego punktu pracy). Można zauważyć pewną prawidłowość związaną z tym, że im większa wartość funkcji celu sterowania, w optymalnym punkcie pracy, tym większa zmienność parametrów ilościowo-jakościowych w otoczeniu tego punktu. Najlepsze wyniki optymalizacji (przeprowadzonej przy warunku ograniczającym na zawartość popiołu) uzyskano dla stru-

Tabela 4

Wskaźniki wrażliwości – Dekompozycja

| NADAWA | UKŁAD | A | | B1 | | B2 | | C | |
|--------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | S _M | S _A | S _M | S _A | S _M | S _A | S _M | S _A |
| N1 | K1 | - | - | 0,0 | 0,0 | 6,0 | 22,0 | 2,7 | 10,0 |
| | K2 | - | - | 2,4 | 2,7 | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 4,5 |
| | K3 | - | - | 2,5 | 5,0 | 1,3 | 5,1 | 9,9 | 38,8 |
| | K4 | - | - | 0,9 | 3,0 | 0,8 | 3,1 | 2,9 | 11,7 |
| | K5 | - | - | 0,5 | 1,8 | 0,0 | 0,1 | 0,4 | 1,9 |
| N0 | K1 | 1,5 | 2,7 | 1,2 | 4,3 | 5,2 | 15,9 | 6,7 | 22,4 |
| | K2 | 1,3 | 0,7 | 3,1 | 4,1 | 1,3 | 4,8 | 1,3 | 5,1 |
| | K3 | 3,0 | 5,1 | 1,9 | 6,6 | 12,3 | 41,4 | 16,0 | 57,7 |
| | K4 | 1,1 | 1,2 | 2,3 | 3,2 | 2,3 | 4,0 | 4,2 | 15,7 |
| | K5 | 0,9 | 2,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,6 | 2,4 |
| N2 | K1 | - | - | 3,3 | 3,5 | 7,3 | 20,6 | 8,5 | 25,3 |
| | K2 | - | - | 1,1 | 2,9 | 1,4 | 3,5 | 4,0 | 13,2 |
| | K3 | - | - | 2,2 | 2,4 | 14,9 | 43,5 | 16,1 | 52,6 |
| | K4 | - | - | 1,7 | 5,1 | 1,5 | 4,5 | 4,0 | 14,0 |
| | K5 | - | - | 3,2 | 3,9 | 6,7 | 19,5 | 0,9 | 3,0 |

ktury technologicznej, w której następuje posobne wzbogacanie węgla (wariant C). Liczba powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, w optymalnym punkcie pracy układu, jest także najmniejsza dla wariantu C. Zależność ta zachodzi dla wszystkich przyjętych do obliczeń grup nadaw. Jednakże struktura wrażliwości powiązań jest zupełnie inna. Liczba produktów, których parametry są wrażliwe na rozpatrywane zakłócenia jest w wariantcie C także największa (tabela 2). Najmniejsza liczba produktów wrażliwych na zakłócenia gęstości rozdziału występuje w wariantcie B2.

Jak wynika z analizy wrażliwości, wielkość zmian parametrów ilościowo-jakościowych zależy w znacznej mierze także od charakterystyk węgla surowego. Dla przypadku, przyjętej do obliczeń, grupy nadaw najłatwiej wzbogacalnych (N1) zmiany ilościowo-jakościowe produktów pod wpływem analizowanych zakłóceń są najmniejsze. Największe zmiany występują w przypadku nadawy trudno wzbogacalnej (N2). Dodatkowo, największe zmiany występują dla wariantu C (układ technologiczny z wzbogacaniem posobnym) niezależnie od przyjętej do obliczeń grupy nadaw. Jednocześnie im nadawa jest trudniej wzbogacalna tym pomiędzy wynikami uzyskanymi dla poszczególnych wariantów różnice w zmienności parametrów produktów są mniejsze.

2. *Cierpisz S., Kalinowski K., Kaula R., Pielot J.*: Sterowanie i optymalizacja produkcji grupy zakładów przeróbki węgla. Monografia nr 107, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
3. *Kalinowski K., Kaula R.*: Anwendung der Empfindlichkeitsanalyse bei der Festlegung von Steuerungsstrukturen technologischer Systeme. GlückaufForschungshefte, 2003, Nr 1, S. 4-10.
4. *Kaula R.*: Zastosowanie analizy wrażliwości w zagadnieniach tworzenia struktur sterowania układu technologicznego na przykładzie układu technologicznego wzbogacania węgla. Mechanizacja i Automatyzaacja Górnictwa 2000, nr 6(354).
5. *Kaula R.*: Zastosowanie modelu całkowitego wrażliwości do określenia struktury sterowań układu technologicznego przeróbki węgla. Materiały XI konferencji Automatyzaacji Procesów Przeróbki kopalni, Szczyrk 1-3 czerwca, 2005 str. 149-162.
6. *Kaula R.*: Zastosowanie metamodeli w optymalizacji produkcji grup układów technologicznych przeróbki węgla. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo z. 269, Gliwice 2005, str. 453-463.
7. *Kaula R.*: Zastosowanie metamodelowania do analizy złożonych procesów przemysłowych. Konferencja „Górnictwo Zrównoważonego Rozwoju 2007”, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 280 Górnictwo, Gliwice 2007, str. 299-310.
8. *Kaula R.*: Wrażliwość struktury systemu na zmianę jego parametrów w układzie sterowania grupy kopalń. Mechanizacja i Automatyzaacja Górnictwa 2007, nr 12.
9. *Kaula R., Pielot J.*: Metoda wyznaczania optymalnej struktury sterowań układów technologicznych przeróbki węgla. Monografia nr 47, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
10. *Kaula R., Pielot J.*: Sposób doboru optymalnych wielkości sterujących układu technologicznego procesów przeróbki węgla. Archives of Mining Sciences, 2005, vol.50, 3.
11. *Kleijnen J.P.*: A comment on Blanning's metamodel for sensitivity analysis: The regression metamodel in simulation. Interfaces 1975, vol.5, pp. 21-23.
12. *Kleijnen J.P.*: Regression metamodels for generalizing simulation results. IEEE Transactions on Systems, Man and cybernetics, 1979, SMC-9, 2, pp. 93-96.

Recenzent: dr hab. inż. Krystian Kalinowski prof. Pol. Śl.

Literatura

1. *Cierpisz S.*: Optymalizacja produkcji jednego zakładu i grupy zakładów wzbogacania węgla. Materiały XI konferencji Automatyzaacji Procesów Przeróbki Kopalni, Szczyrk 1-3 czerwca 2005, str. 41-58.