

Roman KAULA
Politechnika Śląska, Gliwice

ZASTOSOWANIE METAMODELOWANIA DO ANALIZY ZŁOŻONYCH PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

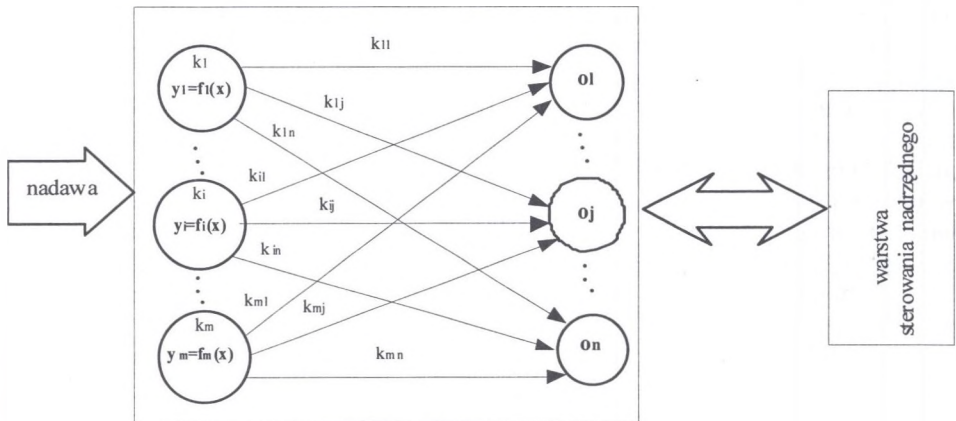
Streszczenie. Jednym z zadań lokalnych i nadrzędnych układów sterowania zakładów przeróbki węgla jest otrzymanie maksymalnej ilości produktu wzbogacania o określonej jakości. Ponieważ optymalne punkty pracy układu ulegają zmianom pod wpływem założeń produkcyjnych lub zakłóceń, konieczna jest optymalizacja bieżąca procesu. Dla złożonych układów technologicznych projektowanie układu najczęściej jest wspomagane przez symulację komputerową. Projektowanie układu nadrzędnego, oparte tylko na numerycznych modelach symulacyjnych, jest jednak ograniczone z powodu trudności przy uwzględnianiu powiązań wejść i wyjść różnych podsystemów będących elementami układu nadrzędnego. Alternatywnym podejściem przy analizie takiego złożonego układu jest strategia budowania modeli podsystemów, a następnie stworzenie metamodelu całego układu. W artykule przedstawiono przykład zastosowania metamodelowania do analizy złożonych procesów przemysłowych.

METAMODELLING APPLICATION IN ANALYSE OF COMPLEX INDUSTRIAL PROCESSES

Summary. The task of supervisory and local control system of a coal preparation plant is obtaining a maximum quantity of commercial products with defined qualitative parameters. Because of set point changes in process leading, there is necessary to running optimization of processes. Processes running optimization requires changes in desired values of control systems. In this point of view computer simulation models are very helpful in control designing for single technological system. The computer simulation in effective way makes possible: to consider different alternative solutions of single technological system, to analyze optimum criterias of preparation processes course at changes of trade contracts or at changes of raw coal characteristics. The complex systems design often requires supported by simulations. The supervisory system design based only on numerical simulation results is limited because of the difficulty in integrating separate subsystem models to predict supervisory system behaviour. An alternate strategy is to build metamodels for each subsystem simulator and integrate the metamodels rather than the original simulation codes. In the paper an example of the metamodeling approach to simulation applications in production optimization of group of coal preparation plants are presented.

1. Wprowadzenie

W wyniku restrukturyzacji polskiego górnictwa powstały podmioty obejmujące grupę kopalń węgla kamiennego, a tym samym grupę układów technologicznych 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 z odbiorcami węgla o_j (o określonych dla każdego odbiorcy parametrach ilościowo-jakościowych produktów) przedstawiono na rys. 1.



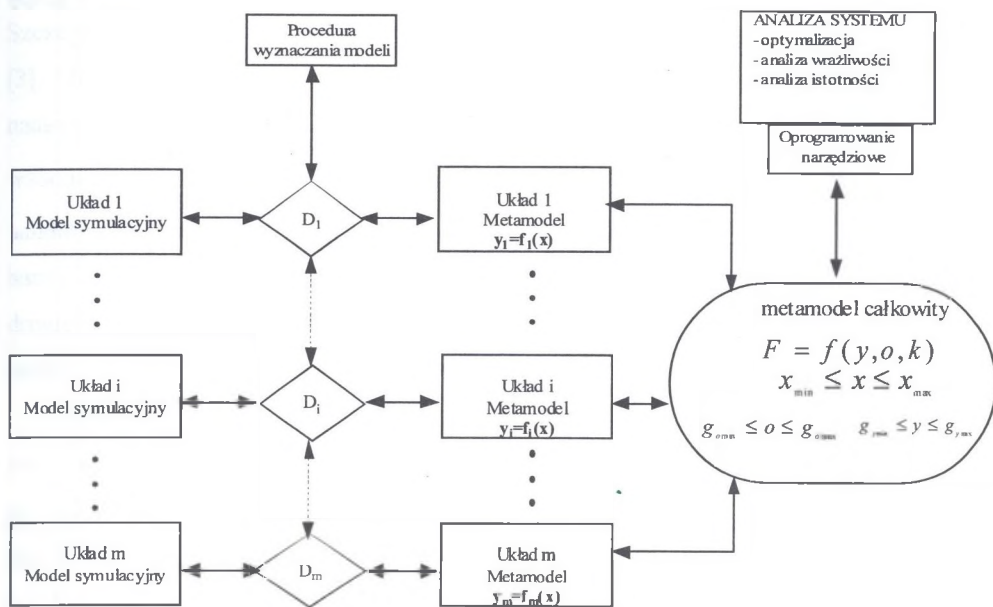
Rys. 1. Schemat powiązań układu nadrzędnego przeróbki węgla
Fig. 1. Interconnection schema of a supervisory system of a coal preparation

Nadrzędnym celem optymalizacji produkcji grupy zakładów przeróbki węgla, jak podano w [2], będzie zapewnienie produkcji węgla według zapotrzebowania odbiorców i jednocześnie uzyskanie maksymalnego zysku, przy uwzględnieniu kosztów wydobycia k_i i transportu k_{ij} oraz ewentualnej maksymalizacji produkcji.

2. Strategie postępowania przy optymalizacji układu nadrzędnego procesów przeróbki węgla

Powszechnie stosowaną metodą analizy zachowania się złożonych rzeczywistych układów technologicznych jest technika symulacyjna wykorzystująca modele symulacyjne. Dla złożonych hierarchicznych (wielowarstwowych) układów składających się z kilku

podsystemów, w których funkcja celu jest funkcją wielokryterialną, projektowanie układu tylko na podstawie modeli symulacyjnych może się okazać trudne ze względu na potrzebę powiązania wejść i wyjść oddzielnych podsystemów (pojedynczych układów technologicznych). Alternatywnym podejściem przy analizie takiego złożonego układu jest zastosowanie strategii metamodelowania. W metamodelowaniu wykorzystujemy metamodelę [11], będącą matematyczną aproksymacją symulacyjnego modelu procesu. Na podstawie metamodeli podsystemów tworzymy metamodel całego układu [1]. Dla określenia optymalnej wartości nadrzędnej funkcji celu sterowania stosuje się algorytmy optymalizacyjne, np. metodę programowania nieliniowego (liniowego). Ogólny schemat struktury modelu układu nadrzędnego, opartej na zastosowaniu metamodeli, przedstawiono na rys. 2.



gdzie: D_i – oznacza procedurę wyznaczania struktury i parametrów modelu i-tego układu

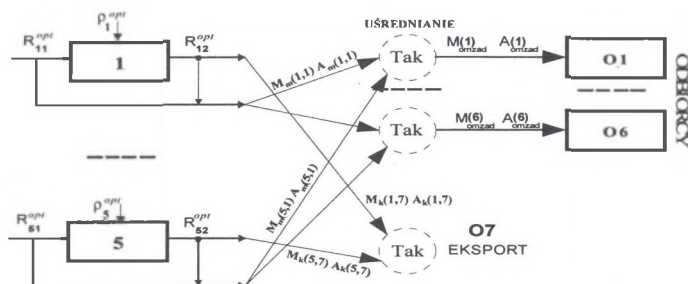
Rys. 2. Struktura modelu układu nadrzędnego opartego na strategii metamodelowania
Fig. 2. Structure of the supervisory system model based on metamodeling strategy

Metamodelowanie składa się z wielu elementów. Określa się graniczne wartości zmian zmiennych układu, a następnie definiuje funkcje celu sterowania. Rozróżnia się trzy podstawowe typy metamodeli [1, 10, 12]: uproszczone modele fizyczne z uwzględnieniem współczynników skali, modele wielomianowe, modele wykorzystujące nowoczesne techniki obliczeniowe, np. sieci neuronowe.

3. Zastosowanie metamodelowania w analizie optymalizacji produkcji grupy kopalń

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 [3]. Uzyskać przy tym można istotny wzrost ilości (masy) produktów z tej samej wyjściowej masy nadaw miałów surowych w poszczególnych zakładach w stosunku do powiązań stosowanych w praktyce. Efekty te zależą od przyjętego kryterium optymalizacji oraz ograniczeń wprowadzonych w ustalanych planach produkcyjnych dla poszczególnych kopalń.

Na rys. 3 pokazano analizowaną, w artykule, strukturę technologiczną systemu grupy zakładów i odbiorców węgla.



Rys. 3. Uproszczony schemat technologiczny systemu grupy zakładów i odbiorców węgla
Fig. 3. Simplified scheme of a group of plants and coal products clients

W układzie tym w poszczególnym i -tym zakładzie wzbogacania część nadawy kierowana jest do osadzarki. Pozostała część nadawy łączona jest z częścią koncentratu osadzarki w celu uzyskania mieszanki o odpowiedniej zawartości popiołu $A_m(i, j)$ (lub wartości opałowej $CV_m(i, j)$), przeznaczonej do utworzenia mieszanki j -tego odbiorcy w jego centralnym obiekcie uśredniania. Pozostała część koncentratu $M_k(i, j)$ o zawartości popiołu $A_k(i, j)$ kierowana jest do centralnego obiektu uśredniania koncentratów przeznaczonych na eksport. System powiązań grupy kopalń z odbiorcami, przedstawiony na rys. 3, został rozpatrzony w dwóch wariantach.

Wariant A ilustruje praktycznie zrealizowany plan produkcji zgodnie z zawartymi umowami z odbiorcami produktów. W artykule założono, że ilość sumarycznego koncentratu uzyskanego w tym wariantcie jest wielkością odniesienia i wynosi 100%. Na podstawie sumarycznych danych dotyczących parametrów jakościowo-ilościowych produktów

odbiorców O1-O7, ilości węgla surowego oraz charakterystyk ilościowo-jakościowych węgla surowego wyznaczono parametry rozdziału R_{i1} , R_{i2} , ρ_i poszczególnych zakładów technologicznych K1-K5.

W *wariancie B* optymalizowane są wartości parametrów rozdziału R_{i1} , R_{i2} , ρ_i , tak aby przy zachowaniu średnich zadanych parametrów mieszanki uzyskać maksymalną ilość koncentratu na eksport.

3.1. Metamodely podsystemów i metamodel całkowity układu

Metamodely podsystemów (i-tego układu technologicznego) zostały wyznaczone na podstawie danych otrzymanych z modelu symulacyjnego układu technologicznego zakładu wzbogacania węgla energetycznego. W układzie tym pominięto sekcję wzbogacania węgla grubego, natomiast sekcję wzbogacania miazgi reprezentuje proces wzbogacania w osadzarce. Szczegółową analizę przyjętego do obliczeń układu technologicznego przedstawiono w pracy [3]. Modele wyznaczone dla przyjętych wartości parametrów jakościowych i ilościowych nadawy i-tej kopalni. Jako zmienne wyjściowe metamodeli przyjęto gęstości rozdziału wzbogacalników, a poprzez zależność $A_i = f_i(\rho)$, zawartości popiołu produktów handlowych z osadzarek. Zmiennymi wejściowymi w tych układach są wychody produktów handlowych. Struktura metamodeli podsystemów przyjęta do obliczeń ma postać wielomianu drugiego rzędu. Metamodel całkowity układu wiąże zależności wynikające z metamodeli podsystemów oraz funkcji celu sterowania systemu nadrzędnego.

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

$$\text{Max}\{M_k\} \text{ przy } M_m = M_{m_zad} \quad (1)$$

przy uwzględnieniu warunków ograniczających na parametry jakościowe produktów:

$$A_{m(k)} \leq A_{m(k)_zad} \quad (CV_m \geq CV_{m_zad}) \quad (2)$$

gdzie: $M_{m(k),j}$ - masa mieszanki energetycznej (koncentratu) j -tego produktu, t,

$A_{m(k),j}$ - zawartość popiołu j -tego produktu mieszanki (koncentratu), %,

$CV_{m,j}$ - wartość opałowa j -tego produktu mieszanki, kJ/kg.

Maksymalizowana jest ilość koncentratu o zadanej średniej zawartości popiołu przy zadanej średniej zawartości popiołu mieszanek energetycznych (wartości opałowej

mieszanek) oraz sumarycznej ilości mieszanek zamówionych przez poszczególnych odbiorców.

Metamodel całkowity, stosowany między innymi w analizie optymalizacyjnej, ma postać:

$$Z = M_k(1,7) + M_k(2,7) + M_k(3,7) + M_k(4,7) + M_k(5,7) = \max \quad (3a)$$

przy spełnieniu następujących ograniczeń:

$$M_{omzad}(j) = \sum_{i=1}^5 M_m(i, j); j=1, \dots, 6 \quad (3b)$$

$$M_n(i) \geq \sum_{j=1}^6 \frac{M_m(i, j)}{K(i, j)} + \frac{M_k(i, 7)}{w(i, 7)}; i=1, \dots, 5 \quad (3c)$$

Przy czym:

$$K(i, j) = \frac{(A_s(i) - A_k(i, j))w(i, j)}{A_s(i) + A_m(i, j)(w(i, j) - 1) - A_k(i, j)w(i, j)} \quad (3d)$$

gdzie: $i = 1, 2, 3, 4, 5, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

$$\left(\sum_{i=1}^5 M_m(i, j)\right)A_{omzad}(j) \geq \sum_{i=1}^5 A_m(i, j)M_m(i, j); j=1, \dots, 6 \quad (3e)$$

$$\left(\sum_{i=1}^5 M_k(i, 7)\right)A_{kzad} \geq \sum_{i=1}^5 A_k(i, 7)M_k(i, 7) \quad (3f)$$

Wychody koncentratów $w(i, j)$ ($i = 1, 2, \dots, 5, j = 1, 2, \dots, 7$) spełniają zależności:

$$a_{2i} \cdot w(i, j)^2 + a_{1i} \cdot w(i, j) + a_{0i} = A_k(i, j) \quad (3g)$$

Do zmiennych decyzyjnych w tym zagadnieniu zalicza się $M_m(i, j)$, $M_k(i, j)$ oraz wychody koncentratów $w(i, j)$. Dla *wariantu B1* przyjęto ograniczenie dotyczące jakości produkowanych koncentratów: $A_k(i, 7) \leq 10\%$, natomiast analizę bez założonych ograniczeń przedstawiono w *wariancie B2*. W przypadku zadanych kontraktem wartości opałowych mieszanek (zamiast zawartości popiołu) w warunkach ograniczających (3c) – (3g) występują wartości $CV(i, j)$. Obliczenia optymalizacyjne funkcji celu sterowania (3a), przy ograniczeniach (3b) – (3f), przeprowadzono z użyciem pakietu narzędziowego Solver programu Excel. Optymalne wartości parametrów rozdziału R_{i1} , R_{i2} , ρ_i otrzymano z zależności wiążących zmienne decyzyjne oraz charakterystyki $A_i = f_i(w)$ i $A_i = f_i(\rho)$.

Wyniki optymalizacji przeprowadzonej dla warunków ograniczających na zawartość popiołu w mieszankach przedstawiono na rys. 4, natomiast dla warunków na zadane wartości opałowe na rys. 5. Optymalne punkty pracy układu scharakteryzowane są przez środkowe punkty krzywych. Dla warunku ograniczającego $A_m \leq A_{m_zad}$ uzyskany wzrost ilości koncentratu, w wariantcie B1, wynosi ponad 8%. W przypadku kiedy nie założono żadnych

ograniczeń na wartość zawartości popiołu w koncentracie (wariant B2), uzyskano prawie 16% wzrostu w odniesieniu do ilości koncentratu na eksport dla układu podstawowego (wariantu A). Dla warunku ograniczającego $CV_m \geq CV_{m_zad}$ uzyskany wzrost ilości koncentratu, w wariantcie B1, wynosi ponad 17%. W przypadku kiedy nie założono żadnych ograniczeń na wartość zawartości popiołu w koncentracie (wariant B2), uzyskano prawie 25% wzrostu w odniesieniu do ilości koncentratu na eksport dla układu podstawowego (wariantu A).

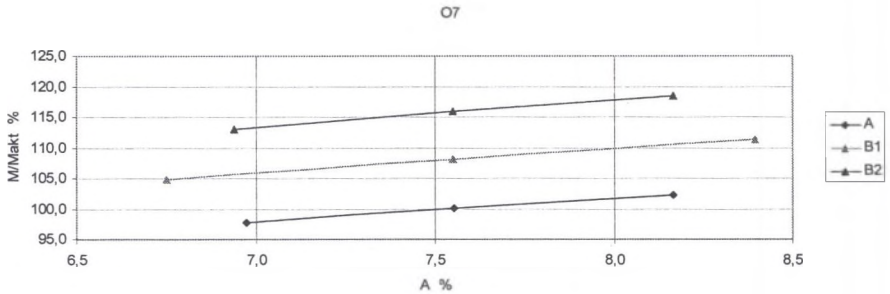
3.2. Wrażliwość struktury systemu na zmianę jego parametrów

System powiązań grupy kopalń z odbiorcami z punktu widzenia systemu sterowania jest układem hierarchicznym. Podstawowymi parametrami wejściowymi takiego układu są gęstości rozdziału wzbogacalników, układów technologicznych poszczególnych zakładów wzbogacania węgla, wchodzących w skład grupy kopalń. Optymalny układ powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla wymaga zatem nastaw optymalnych wartości gęstości rozdziału ρ_{opt} wzbogacalników. Procesy wzbogacania są procesami nieliniowymi, zatem wartości masy (ilości), zawartości popiołu w węglu i wartości opałowej węgla mogą się znacznie różnić dla nastaw parametrów rozdziału w pobliżu optimum w stosunku do tych wyznaczonych dla optymalnego punktu pracy. Dogodnym narzędziem do analizy wpływu odchyłek parametrów sterujących na funkcję celu sterowania układu nadrzędnego jest zastosowanie metamodelu całkowitego układu. Ponieważ dysponujemy wielkościami wejściowymi i wyjściowymi podsystemów oraz modelami podsystemów, możemy wyznaczyć w prosty sposób punkty pracy układu w pobliżu optimum.

W celu określenia wpływu zmian gęstości rozdziału na parametry ilościowo-jakościowe omawianych wariantów systemu 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 ($\rho = \rho_{opt} \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$). Dodatkowo założono, że zmiany te wystąpią równocześnie dla wszystkich parametrów rozdziału. Otrzymano w ten sposób granice możliwych odchyłek od wartości optymalnych.

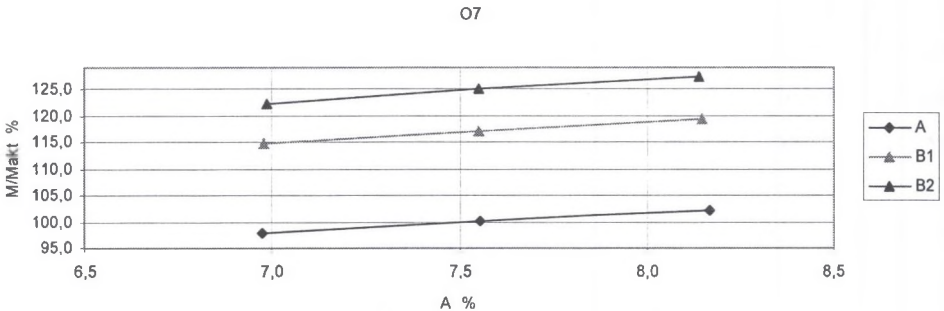
Na rys. 4-5 przedstawiono zmienność wartości parametrów ilościowo-jakościowych na wielkość eksportu dla różnych wariantów analizy. Środkowe punkty na rysunku odpowiadają wartościom optymalnym masy (ilości) węgla na eksport przy zadanej wartości zawartości popiołu w koncentracie dla różnych wariantów analizy. Można zauważyć bardzo zbliżoną

zmiennosc parametrów dla rozpatrywanych wariantów. Współczynnik $\frac{\Delta M_k}{\Delta A_k}$ jest praktycznie taki sam dla wszystkich systemów.



Rys. 4. Ilustracja graficzna zmienności parametrów ilościowo-jakościowych produktu na eksport (odbiorca O7), dla warunku $A_m \leq A_{m_zad}$

Fig. 4. Illustration of variations of quality-quantity parameters of concentrate for export (client O7) for condition $A_m \leq A_{m_zad}$



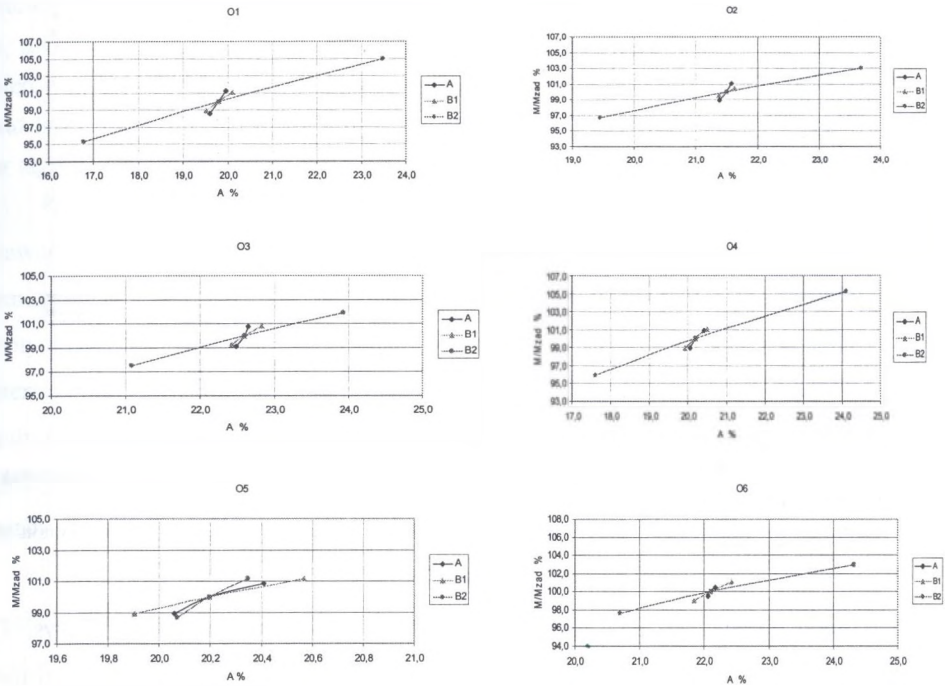
Rys. 5. Ilustracja graficzna zmienności parametrów ilościowo-jakościowych produktu na eksport (odbiorca O7), dla warunku $CV_m \geq CV_{m_zad}$

Fig. 5. Illustration of variations of quality-quantity parameters of concentrate for export (client O7) for condition $CV_m \geq CV_{m_zad}$

Na rys. 6-7 przedstawiono zmienność wartości parametrów ilościowo-jakościowych produktów odbiorców O1–O6 energetyki zawodowej wywołaną zmianami parametrów rozdziału wzbogacalników, dla warunku ograniczającego na zawartość popiołu (rys. 6) i wartość opałową (rys. 7). Środkowe punkty na rysunkach odpowiadają wartościom zadanyim produktów (określonym kontraktem handlowym).

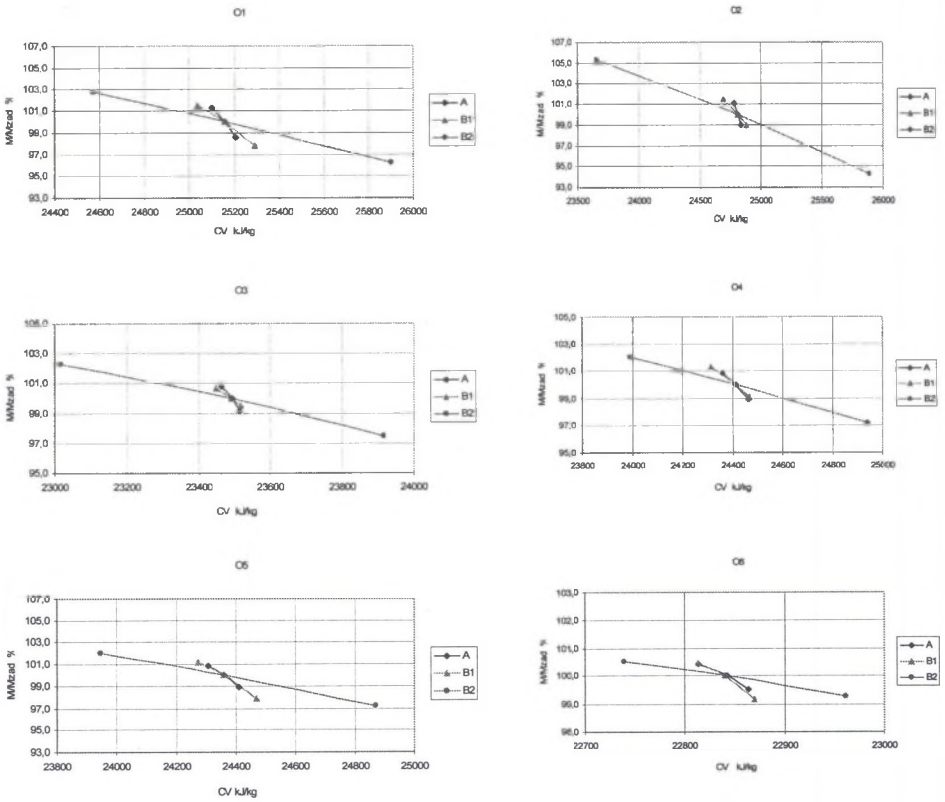
Jak można zauważyć, dla warunku ograniczającego przyjętego dla zawartości popiołu w produktach (rys. 6) największe zmiany jakościowe i ilościowe produktów u odbiorców mogą wystąpić w wariantach B2: do $\pm 5\%$ w odniesieniu do masy węgla i do $\pm 4\%$

w odniesieniu do bezwzględnej zawartości popiołu. Najmniejsze zmiany jakościowo-ilościowe występują w wariantach (A, B1). Zmiany te są mniejsze od $\pm 1\%$ w odniesieniu do ilości węgla i $\pm 1\%$ w odniesieniu do bezwzględnej zawartości popiołu. Duże odchyłki od wartości zadanej występujące w wariacie B2 wynikają z przyjętego założenia dotyczącego braku ograniczenia na zawartość popiołu w produktach wzbogacania. W tym przypadku, w optymalnym punkcie pracy, niektóre produkty wzbogacania produkowane są przy wysokich gęstościach rozdziału.



Rys. 6. Ilustracja graficzna zmienności parametrów ilościowo-jakościowych zadanej kontraktem mieszanki energetycznej – produktów odbiorców O1-O6, dla warunku $A_m \leq A_{m_zad}$

Fig. 6. Illustration of variations of quality-quantity parameters of the blend (clients O1-O6) for condition $A_m \leq A_{m_zad}$



Rys. 7. Ilustracja graficzna zmienności parametrów ilościowo-jakościowych zadanej kontraktem mieszanki energetycznej – produktów odbiorców O1-O6, dla warunku $CV_m \geq CV_{m_zad}$

Fig. 7. Illustration of variations of quality–quantity parameters of the blend (clients O1-O6) for condition $CV_m \geq CV_{m_zad}$

Dla warunku ograniczającego, przyjętego dla wartości opałowej produktów (rys. 7), największe zmiany jakościowe i ilościowe produktów u odbiorców występują również w wariancie B2: do $\pm 5\%$ w odniesieniu do masy węgla i do ± 1000 kJ/kg w odniesieniu do bezwzględnej wartości opałowej. Najmniejsze zmiany jakościowo-ilościowe występują w wariantach (A, B1). Zmiany te są mniejsze od $\pm 2\%$ (wariant B1) oraz $\pm 1\%$ (wariant A) w odniesieniu do ilości węgla i ± 100 kJ/kg w odniesieniu do bezwzględnej zawartości wartości opałowej.

W obu przypadkach rozpatrywanych warunków ograniczających uzyskano najmniejsze odchyłki od punktu pracy dla wariantu A. Należy zaznaczyć, że w tym przypadku wartości parametrów sterujących układu nie są optymalne, a wartość funkcji celu sterowania (masa koncentratu na eksport) jest przyjęta jako wyjściowa. Można zauważyć pewną prawidłowość

związaną z tym, że im większa wartość funkcji celu w optymalnym punkcie pracy, tym większa zmienność parametrów ilościowo-jakościowych w otoczeniu tego punktu.

4. Podsumowanie

Dla złożonych procesów przemysłowych analiza systemu realizowana jest najczęściej przez symulację komputerową. Projektowanie systemu nadrzędnego, oparte tylko na numerycznych modelach symulacyjnych, jest ograniczone z powodu trudności wynikających z uwzględnienia wpływu zmian wejść i wyjść różnych podsystemów na funkcję celu sterowania systemem nadrzędnego. Alternatywną strategią jest zbudowanie metamodeli dla każdego podsystemu, na podstawie danych symulacyjnych, a następnie zastosowanie ich w algorytmie optymalizacyjnym.

Procesy wzbogacania są procesami nieliniowymi, zatem wartości masy (ilości), zawartości popiołu w węglu i wartości opałowej węgla mogą się znacznie różnić dla nastaw parametrów rozdziału w pobliżu optimum w stosunku do tych wyznaczonych dla optymalnego punktu pracy. Dogodnym narzędziem do analizy wpływu odchyłek parametrów sterujących na funkcję celu sterowania układu nadrzędnego jest zastosowanie metamodelu całkowitego układu. Ponieważ dysponujemy wielkościami wejściowymi i wyjściowymi podsystemów oraz modelami podsystemów, możemy wyznaczyć w prosty sposób punkty pracy układu w pobliżu optimum.

Metamodeli mogą być użyte między innymi: w analizie przewidywania i planowania reakcji układu na zmiany jego parametrów, to znaczy -w analizie „co-jeśli”, optymalizacji parametrów układu wyznaczonych dla określonych funkcji celu.

LITERATURA

1. Barton R.: Design of experiments for fitting subsystem metamodels. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, ed. S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Winters, and B. L. Nelsen, pp. 303-310.
2. Cierpisz S.: Optymalizacja produkcji jednego zakładu i grupy zakładów wzbogacania węgla. Materiały XI Konferencji Automatyzacji Procesów Przeróbki Kopalni, Szczyrk 1-3 czerwca 2005, str. 41-58.
3. Cierpisz S., Kalinowski K., Kaula R., Pielot J.: Sterowanie i optymalizacja produkcji grupy zakładów przeróbki węgla. Monografia nr 107, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.

4. Kalinowski K., Kaula R.: Anwendung der Empfindlichkeitsanalyse bei der Festlegung von Steuerungsstrukturen technologischer Systeme. Glückauf Forschungshefte, 2003, Nr 1, S. 4-10.
5. Kaula R.: Zastosowanie analizy wrażliwości w zagadnieniach tworzenia struktur sterowania układu technologicznego na przykładzie układu technologicznego wzbogacania węgla. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 6 (354), Katowice 2000, str. 27-32.
6. Kaula R.: Zastosowanie modelu całkowitego wrażliwości do określenia struktury sterowań układu technologicznego przeróbki węgla. Materiały XI Konferencji Automatyzacji Procesów Przeróbki Kopalni, Szczyrk 1-3 czerwca 2005, str. 149-162.
7. Kaula R.: Zastosowanie metamodeli w optymalizacji produkcji grupy układów technologicznych przeróbki węgla. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo z. 269, Gliwice 2005, str. 453-463.
8. Kaula R., Pielot J.: Metoda wyznaczania optymalnej struktury sterowań układów technologicznych przeróbki węgla. Monografia nr 47, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
9. Kaula R., Pielot J.: Sposób doboru optymalnych wielkości sterujących układu technologicznego procesów przeróbki węgla. Archives of Mining Sciences, 2005, vol.50, 3.
10. Kilmer R.A., Smith A.E., Shuman L.J.: An emergency department simulation and a neural network metamodel. Journal of the Society for Health systems, 1995, 5/3, pp.63-79.
11. Kleijnen J.P.C.: 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. Kazimierz Trybalski, prof. nzw. AGH