

Roman KAULA  
Politechnika Śląska, Gliwice

## ZASTOSOWANIE METAMODELI W OPTIMALIZACJI PRODUKCJI GRUPY UKŁADÓW TECHNOLOGICZNYCH PRZERÓBKİ WĘGLA

**Streszczenie.** 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 w przewidywaniu zachowania się układu nadrzędnego. W artykule przedstawiono przykład zastosowania metamodeli do optymalizacji produkcji układów technologicznych przeróbki węgla. Omówiono korzyści z użycia metamodeli w projektowaniu złożonych procesów technologicznych wykorzystujących modele symulacyjne.

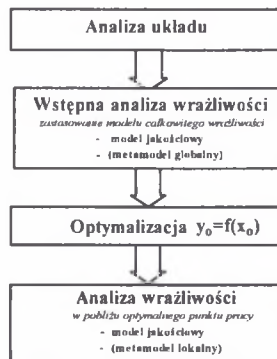
## METAMODELS APPLICATION IN PRODUCTION OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS GROUP OF COAL PREPARATION

**Summary.** 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 and integrate the metamodels rather the original simulation codes. In the paper an example of the metamodeling approach to simulation applications in production optimization of the technological systems of coal preparation are presented.

### 1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych zadań układów sterowania procesów przeróbki węgla jest uzyskanie maksymalnej ilości produktów handlowych węgla o zadanej jakości, spełniających zapotrzebowanie różnych odbiorców. Zatem wartości zmiennych sterujących poszczególnych układów powinny być tak dobrane, aby uzyskać optymalne sterowanie procesem,

minimalizując lub maksymalizując określony wskaźnik jakości. Z tego względu istotna jest znajomość zależności wiążących wybraną funkcję celu z tymi zmiennymi, które mogą być wykorzystane jako zmienne sterujące do celów nadrzędnej optymalizacji. Informacje o wpływie poszczególnych zmiennych na funkcję celu sterowania można otrzymać korzystając z analizy wrażliwości [3, 4]. Tak więc powiązanie algorytmu wyznaczania ekstremum funkcji celu z analizą wrażliwości pozwala na dobór optymalnych wielkości sterujących układami technologicznymi przeróbki węgla. Metodyka doboru optymalnych wielkości sterujących układu technologicznego przeróbki węgla została szczegółowo przedstawiona w pracy [6]. Główne etapy tej metody (rys. 1) polegają na: analizie układu, przeprowadzeniu wstępnej analizy wrażliwości, wykonaniu obliczeń optymalizacyjnych, dokonaniu ponownej analizy wrażliwości w pobliżu optymalnego punktu pracy.



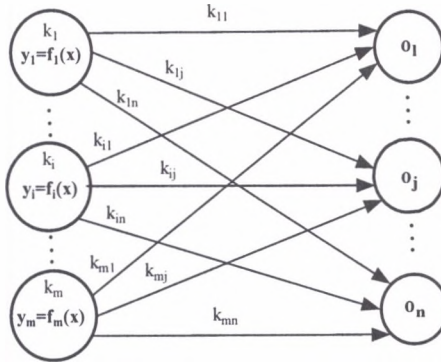
Rys. 1. Algorytm wyznaczania optymalnej struktury sterowań układu technologicznego  
Fig. 1. Determination algorithm of operating variables structure of technological system

Dysponując informacjami dotyczącymi wpływu zmiennych sterujących na wybraną funkcję celu sterowania można wyznaczyć tę zależność w postaci modelu analitycznego. Matematyczną aproksymację symulacyjnego modelu procesu nazywamy *metamodelem* [9].

## 2. Optymalizacja produkcji grupy układów technologicznych przeróbki węgla

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. 2.



Rys. 2. Schemat powiązań układu nadrzędnego przeróbki węgla  
Fig. 2. 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. Zatem problem optymalizacji układu przedstawionego na rys. 2, ilustrują następujące wyrażenia:

Dla funkcji celu sterowania  $F$ , dążymy do maksymalizacji (minimalizacji) równania

$$F = f(y, o, k) \quad (1)$$

Przy spełnieniu ograniczeń dotyczących:

- zmiennych sterujących,

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (2)$$

gdzie:  $x_{\min(\max)}$  – wartości minimalne (maksymalne) na przykład gęstości rozdziału wzbogacalników.

- parametrów ilościowych i jakościowych produktów wzbogacania

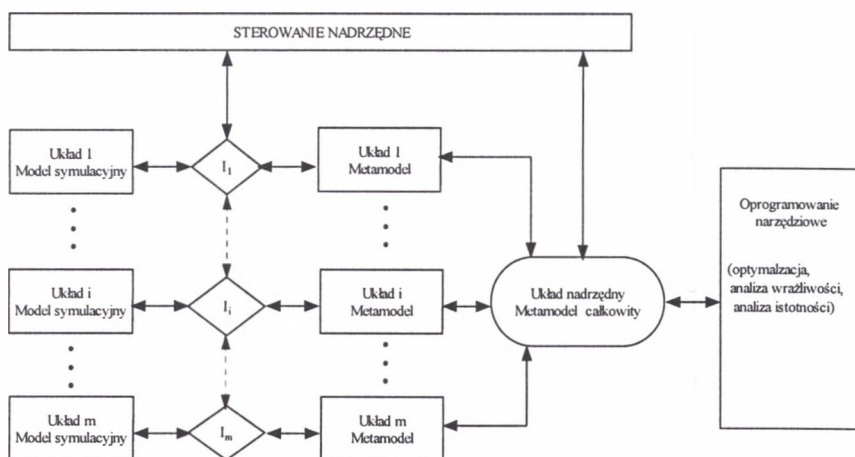
$$g_{y \min} \leq y \leq g_{y \max} \quad (3)$$

$$g_{o \min} \leq o \leq g_{o \max} \quad (4)$$

gdzie:  $g_{\min(\max)}$  – wartości minimalne (maksymalne) na przykład zawartości popiołu,  
 $y, o$  – parametry produktów odpowiednio: układów technologicznych, odbiorców.

## 2.1. 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 okazać się trudne ze względu na potrzebę powiązania wejść i wyjść oddzielnych podsystemów (pojedynczych układów technologicznych). Alternatywną strategią jest budowanie metamodeli dla każdego podsystemu i następnie przy wykorzystaniu także zmiennych pośrednich (funkcji celu podsystemów) wyznaczanie nadrzędnej funkcji celu [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. 3.



Rys. 3. Struktura modelu układu nadrzędnego opartej na strategii metamodelowania

Fig. 3. Structure of the supervisory system model based on metamodeling strategy

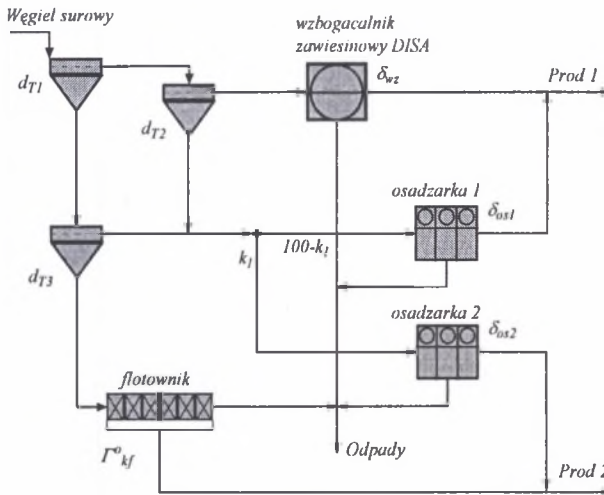
gdzie:  $I_i$  - oznacza procedurę identyfikacji modelu  $i$ -tego układu

Identyfikacja metamodelu (metamodelowanie) składa się z wielu elementów. Określa się graniczne wartości zmian zmiennych układu, a następnie definiuje funkcje celu sterowania. Dla analizy całościowej buduje się metamodel globalny, dla analizy w ograniczonym zakresie zmian – metamodel lokalny. Rozróżnia się trzy podstawowe typy metamodeli [1, 8, 10]: uproszczone modele fizyczne z uwzględnieniem współczynników skali, modele wielomianowe, modele wykorzystujące nowoczesne techniki obliczeniowe, np. sieci

neuronowe. Bardzo pomocnym narzędziem przy określeniu struktury metamodelu jest analiza wrażliwości. Osobnym zagadnieniem jest zaprojektowanie eksperymentu symulacyjnego. Na podstawie takiego eksperymentu wyznacza się parametry metamodelu, przy czym wyznaczony model powinien jak najwierniej odzwierciedlać rzeczywiste zachowanie się układu. Dla sprawdzenia poprawności wyznaczonego modelu przeprowadza się jego weryfikację.

### 3. Zastosowanie metamodeli w optymalizacji produkcji złożonego układu technologicznego przeróbki węgla

Schemat analizowanego układu technologicznego przedstawiony został na rys. 4.



Rys. 4. Schemat złożonego układu technologicznego  
Fig. 4. Scheme of the complex technological system

W schemacie tym znajdują się symbole maszyn i urządzeń:

- trzech przesiewaczy dwuproduktowych w układzie mieszanym przesiewania o wielkościach otworów sit  $d_{T1}$ ,  $d_{T2}$  i  $d_{T3}$ ,
- wzbogacalnika zawiesinowego Disa o gęstości rozdziału  $\delta_{wz}$ ,
- dwóch osadzarek o gęstościach rozdziału  $\delta_{os1}$ ,  $\delta_{os2}$ ,
- flotownika, którego zmienną sterującą jest względny udział koncentratu flotacyjnego  $\Gamma^0_{kf}$ ,
- rozdzielacza strumienia części węgla surowego o współczynniku rozdziału  $k_1$ ,

- strumieni wyjściowych przedstawiających produkty końcowe – sortymenty handlowe (*Prod 1*, *Prod 2*) i odpady kamienne (*Odpady*).

### 3.1. Symulacja komputerowa i metamodelowanie

Dla porównania wyników otrzymanych za pomocą algorytmu optymalizacyjnego zastosowanego w modelu symulacyjnym i przy użyciu wyznaczonych metamodeli, rozpatrzono jeden z kilku przypadków optymalizacji układu z rys. 4, omówionych szczegółowo w artykule [7]. W artykule tym została przedstawiona wielowariantowa analiza zawierająca, między innymi: wstępną analizę wrażliwości, wyniki przeprowadzonych obliczeń optymalizacyjnych dla wybranych funkcji celu sterowania, analizę wrażliwości w pobliżu optymalnych punktów pracy.

W rozpatrywanym przypadku poszukiwania optymalnego punktu pracy układu, dla określonych założeń produkcyjnych, nałożono ograniczenia na zawartość popiołu w produktach handlowych oraz ograniczenie wychodu jednego z produktów (tabl. 1).

Tablica 1

Oznaczenia i zakresy dopuszczalnych wartości parametrów produktów

Nazwa produktu handlowego	Parametr jakościowy	Zakres wartości parametru jakościowego
<i>Prod 1</i>	zawartość popiołu $A_1$	11,00–11,99 %
<i>Prod 2</i>	zawartość popiołu $A_2$	7,00–7,99 %
<i>Prod 1</i>	Wychód $\Gamma_1$	15,00–20,00 %

Jako zmienne wyjściowe metamodeli przyjęto: wychody produktów handlowych ( $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ), zawartości popiołu ( $A_1$ ,  $A_2$ ), zawartości siarki całkowitej ( $Sc_1$ ,  $Sc_2$ ) oraz wartości opałowe ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ). Na podstawie analizy charakterystyk graficznych wielkości wyjścia-wejścia układu (kształtu powierzchni) do aproksymacji przyjęto postać modelu wielomianowego drugiego stopnia:

$$Y = a_0 + \sum_{j=1}^5 a_j x_j + \sum_{j=1}^4 \sum_{k=j+1}^5 a_{jk} x_j x_k + \sum_{j=1}^5 a_{jj} x_j^2 \quad (5)$$

gdzie:  $x_j$  – wartość  $j$ -tej zmiennej sterującej ( $x_1$ – $x_5$ , jak w tabl. 2); standaryzowana w przedziale  $\langle -1, 1 \rangle$ ,

$Y$  – wyjścia modeli;  $Y \in \{\Gamma_1, \Gamma_2, A_1, A_2, Sc_1, Sc_2, Q_1, Q_2\}$ .

Strukturę metamodeli określono na podstawie analizy wrażliwości wykonanej w pobliżu optymalnego punktu pracy układu [5]. Parametry modeli wyznaczono na podstawie eksperymentów przeprowadzonych w pobliżu optymalnego punktu pracy, przy zakresach

zmian zmiennych sterujących przedstawionych w tabelicy 2. Wartości współczynników zidentyfikowanych metamodeli podano w tabelicy 3.

Tabela 2

Oznaczenia i zakresy zmian zmiennych sterujących

Operacja Przeróbca	Oznaczenie na rys. 4	Zakres zmian zmiennej sterowalnej	Numer zmiennej w metamodelu
Wzbogacanie we flotowniku	$\Gamma_{kf}$	73–81 %	$x_1$
Rozdzielanie	$k_1$	92–100 %	$x_2$
Wzbogacanie w osadzarce 1	$\delta_{os1}$	1,30–1,38 g/cm <sup>3</sup>	$x_3$
Wzbogacanie w osadzarce 2	$\delta_{os2}$	1,58–1,66 g/cm <sup>3</sup>	$x_4$
Wzbogacanie we wzbogacalniku zawieszonym	$\delta_{zw}$	1,74–1,82 g/cm <sup>3</sup>	$x_5$

Tabela 3

Współczynniki metamodeli dla założonych wyjść układu z rys. 4

Współczynnik metamodelu	$\Gamma_1$	$A_1$	$Sc_1$	$Q_1$	$\Gamma_2$	$A_2$	$Sc_2$	$Q_2$
$a_0$	19,6553	10,7601	1,0864	29197	41,2283	7,9791	0,8892	29372
$a_1$	0	0	0	0	0,3839	0,4508	0,0144	-167
$a_2$	-0,9001	0,2413	0,0139	-55	1,4096	0,0033	0,0006	1
$a_3$	0,1617	-0,0393	-0,0011	10	0	0	0	0
$a_4$	0	0	0	0	0,5517	0,363	0,0106	-137
$a_5$	0,3367	0,5883	0,0072	-226	0	0	0	0
$a_{12}$	0	0	0	0	0,0008	-0,0158	-0,0009	6
$a_{13}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_{14}$	0	0	0	0	-0,0001	-0,0108	-0,0009	4
$a_{15}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_{23}$	-0,1652	0,0383	0,0017	-10	0	0	0	0
$a_{24}$	0	0	0	0	0,0232	0,0025	0,0009	-1
$a_{25}$	0,0026	0,0212	-0,0009	-9	0	0	0	0
$a_{34}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_{35}$	0	-0,0032	-0,0009	2	0	0	0	0
$a_{45}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_{11}$	0	0	0	0	0,0027	0,1391	0,0067	-50
$a_{22}$	0	0,0089	-0,0006	-3	-0,0011	-0,0006	0,0006	0
$a_{33}$	-0,0183	0,0106	0,0011	-3	0	0	0	0
$a_{44}$	0	0	0	0	-0,0484	-0,0002	-0,0005	1
$a_{55}$	0,1680	0,2886	0,0037	-111	0	0	0	0

Wartości parametrów produktów wyznaczone na podstawie metamodeli, przy wartościach zmiennych sterujących w rozpatrywanym optymalnym punkcie pracy układu, są identyczne z wynikami otrzymanymi w pracy [7].

### 3.2. Przykład zastosowania metamodeli do optymalizacji produkcji układu technologicznego – przypadek zmiennych założeń produkcyjnych

W celu sprawdzenia możliwości zastosowania wyznaczonych metamodeli przeprowadzono obliczenia, przy innych założeniach produkcyjnych (wzór 8) niż w pkt. 3.1. Założono także, że wychód koncentratu z procesu flotacji jest stały i równy  $I_{kf}^* = 80\%$ , a współczynnik rozdziału rozdzielacza  $k_1 = 100\%$ .

Jako funkcję celu sterowania  $F$  przyjęto *maksymalną* wartość wychodu mieszanki produktów:

$$F = \Gamma_1 + \Gamma_2 \quad (6)$$

przy spełnieniu ograniczeń nałożonych na:

- zmienne sterujące,

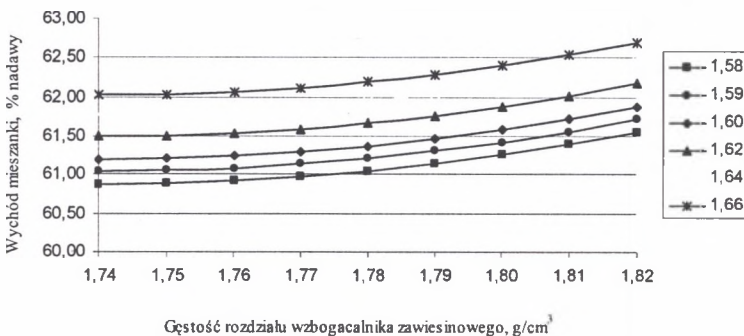
$$\begin{aligned} 1,58 \leq x_4 \leq 1,66 \\ 1,74 \leq x_5 \leq 1,82 \end{aligned} \quad (7)$$

- parametry jakościowe produktów i mieszanki,

$$\begin{aligned} g_1 = A_1 \geq 11,00, g_2 = A_1 \leq 11,99 \\ g_3 = A_2 \geq 8,00, g_4 = A_2 \leq 8,99 \\ g_5 = A_m = \frac{\Gamma_1 A_1 + \Gamma_2 A_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2} \leq 9,00 \end{aligned} \quad (8)$$

Obliczenia optymalizacyjne wykonano za pomocą programu Solver pakietu Excel. Otrzymane wartości zmiennych sterujących są następujące:  $\delta_{os2} = 1,59 \text{ g/cm}^3$ ,  $\delta_{wz} = 1,78 \text{ g/cm}^3$ .

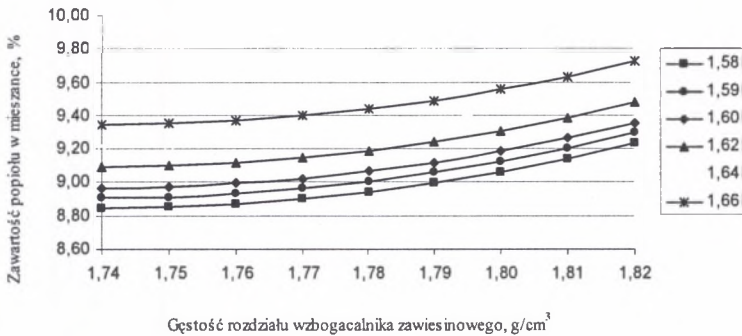
Na rys. 5 i rys. 6 przedstawiono odpowiednio: wychód mieszanki i zawartość popiołu w mieszance w zależności od zmian gęstości rozdziału wzbogacalnika grawitacyjnego, przy różnych wartościach gęstości rozdziału w osadzarce 2.



Rys. 5. Wpływ zmian gęstości rozdziału wzbogacalnika zawiesinowego na wychód mieszanki przy różnych wartościach gęstości rozdziału w osadzarce 2

Fig. 5. Influence of separation density changes of heavy media separator on blend yield at different values of separation density in jig 2

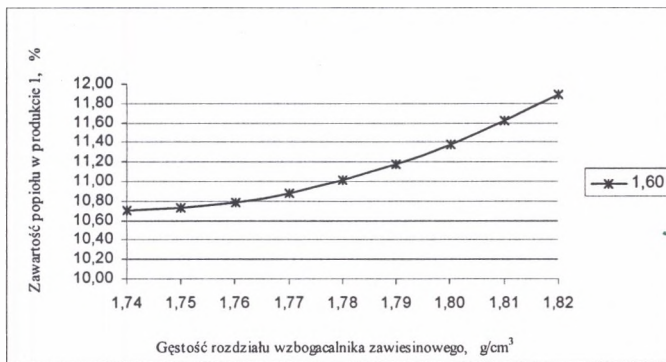




Rys. 6. Wpływ zmian gęstości rozdziału wzbogacalnika zawiesinowego na zawartość popiołu w mieszance przy różnych wartościach gęstości rozdziału w osadzarce 2

Fig. 6. Influence of separation density changes of heavy media separator on ash content in blend at different values of separation density in jig 2

Z analizy rys. 5 i rys. 6 wynika, że największą wartość wychodu mieszanki, przy spełnieniu ograniczenia dotyczącego zawartości popiołu w mieszance ( $A_m \leq 9,00\%$ ), uzyskuje się przy wartościach gęstości rozdziału  $\delta_{wz}=1,76\text{ g/cm}^3$  oraz  $\delta_{os2}=1,60\text{ g/cm}^3$ . Niespełnione jest wtedy jednak ograniczenie dotyczące zawartości popiołu w produkcie 1 (rys. 7).



Rys. 7. Wpływ gęstości rozdziału wzbogacalnika zawiesinowego na zawartość popiołu w produkcie 1 przy  $\delta_{os2}=1,60\text{ g/cm}^3$

Fig. 7. Influence of separation density changes of heavy media separator on ash content in blend at  $\delta_{os2}=1,60\text{ g/cm}^3$

Przedstawiona na rys. 5–7 analiza graficzna potwierdziła poprawność wyników obliczeń otrzymanych na podstawie metamodeli zastosowanych w wybranym algorytmie optymalizacyjnym.

#### 4. Podsumowanie

Dla złożonych układów technologicznych projektowanie jest wspomagane najczęściej przez symulację komputerową. Projektowanie układu nadrzędnego, o strukturze hierarchicznej, oparte tylko na numerycznych modelach symulacyjnych jest ograniczone z powodu trudności wynikających z uwzględnienia wpływu zmian wejść i wyjść różnych podsystemów na zachowanie się układu nadrzędnego. Alternatywną strategią jest zbudowanie metamodeli dla każdego podsystemu, na podstawie danych symulacyjnych, a następnie zastosowanie ich w algorytmie optymalizacyjnym. Zastosowanie metamodeli ma istotne zalety, gdyż:

- zwykła analiza optymalizacyjna na danych dyskretnych dla złożonego układu wielokryterialnego wymaga rozpatrzenia ogromnej liczby punktów pracy układu (tym samym czasu obliczeń). Wykonanie takich obliczeń może spowodować przepełnienie pamięci jednostki obliczeniowej,
- modele podsystemów mogą być wyznaczone za pomocą różnych programów i mieć różną postać,
- można elastycznie formułować funkcje celu sterowania.

Metamodeli w symulacji komputerowej mogą być użyte między innymi: do analizy zachowania systemu rzeczywistego, przewidywania i planowania zachowania systemu, to znaczy w analizie „co-jeśli”, optymalizacji parametrów układu wyznaczonych na podstawie modelu symulacyjnego, sprawdzania istotności parametrów modelu symulacyjnego.

*Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego KBN 4 T12A 035 28.*

#### 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. Kalinowski K., Kaula R.: Anwendung der Empfindlichkeitsanalyse bei der Festlegung von Steuerungsstrukturen technologischer Systeme. Glückauf Forschungshefte, 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 Automatyzacja Górnictwa*, nr 6 (354), Katowice 2000, str. 27-32.
5. Kaula R.: Zastosowanie modelu całkowitego wrażliwości do określenia struktury sterowań układu technologicznego przeróbki węgla. *Materiały XI konferencji Automatyzacji Procesów Przeróbki kopalin*, Szczyrk 1-3 czerwca, 2005 str. 149-162.
6. Kaula R., Pielot J.: Metoda wyznaczania optymalnej struktury sterowań układów technologicznych przeróbki węgla. *Monografia nr 47*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
7. Kaula R., Pielot J.: Sposób doboru optymalnych wielkości sterujących układu technologicznego procesów przeróbki węgla. *Archives of Mining Sciences*, 2005, vol. 50, 3 (w druku).
8. Kilmner 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.
9. 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.
10. 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. ndzw. w AGH