

Wybrane zagadnienia sterowania nadrzędnego grupy zakładów przeróbki węgla

Artykuł dotyczy wybranych zagadnień sterowania nadrzędnego w układzie grupy zakładów przeróbki węgla. W opracowaniu zostały przedstawione wyniki analizy optymalizacyjnej, dotyczącej sieci powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla. Jako kryterium optymalizacji przyjęto zysk ze sprzedaży koncentratów węglowych. Ograniczeniami w rozpatrywanym zagadnieniu są parametry ilościowo-jakościowe mieszanek węgla. Przeprowadzona została analiza optymalizacyjna z uwzględnieniem maksymalnie dwóch powiązań produkcyjnych pomiędzy pojedynczymi producentami a odbiorcami węgla. Określono wpływ przyjętych ograniczeń na wyniki ekonomiczne produkcji. Badania przeprowadzono metodami symulacyjnymi.

1. WPROWADZENIE

Zagadnieniom sterowania i optymalizacji produkcji grupy zakładów przeróbki węgla poświęcono wiele prac realizowanych w Katedrze Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej [1-6]. Z punktu widzenia sterowania produkcją, grupa zakładów przeróbki węgla jest układem hierarchicznym, składającym się z kilku podsystemów o określonych funkcjach celu y_i oraz zmiennych sterowalnych x_i dla i -tego podsystemu. Dla przyjętej liczby odbiorców o_j (o określonych, dla każdego odbiorcy, parametrach ilościowo-jakościowych produktów) istnieje możliwość k_{ij} powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla. W zależności od przyjętej sieci powiązań, umowy handlowe można zrealizować na wiele sposobów, dostosowując odpowiednio parametry ilościowo-jakościowe produktów jednego zakładu, do odpowiednich parametrów produktów innych zakładów.

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. Dla przyjętego kryterium, rozpatrując wszystkie warianty powiązań produkcyjnych, uzyskamy maksimum funkcji celu. Praktyka przemysłowa sprowadza się do zawierania bezpośrednich umów handlowych, na produkty o określonych parametrach ilościowo-jakościowych, pomiędzy pojedynczymi kopalniami i zakładami energetyki zawodowej. W rozpatrywanym w pracy [2] zagadnieniu, dotyczącym optymalizacji produkcji w grupie zakładów przeróbki węgla, punktem wyjścia była zrealizowana w praktyce struktura powiązań produkcyjnych (scharakteryzowana określonymi umowami handlowymi), pomiędzy pięcioma kopalniami i sześcioma odbiorcami energetyki zawodowej. Na podstawie przeprowadzonych badań optymalizacyjnych uzyskano optymalną strukturę powiązań produkcyjnych (różną od zrealizowanej w praktyce). Wzrost produkcji (ilości masy koncentratu z tej samej wyjściowej masy nadaw miałów surowych w poszczególnych zakładach) w stosunku do powiązań zrealizowanych w praktyce wyniósł kilkanaście procent. W celu uzyskania produktu o średniej wartości parametrów jakościowych równych wartości zadanej, wymaganej przez odbiorców, w przeprowadzonych badaniach optymalizacyjnych przyjęto możliwość uśredniania produktów (o różnych parametrach jakościowych) z kilku kopalń.

Przy dużej liczbie powiązań produkcyjnych, dotyczących jednego odbiorcy, zwiększa się jednak prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji awaryjnej. Taka sytuacja może mieć na przykład miejsce przy problemach transportowych lub dotrzymaniu terminowości dostaw (np. w przypadku przerwy dostaw z którejś kopalni). Problemy te zostaną ograniczone, jeżeli zmniejszy się ilość powiązań produkcyjnych pomiędzy producentami i odbiorcami. W pracy [6] przeprowadzono badania dotyczące optymalizacji produkcji grupy zakładów przeróbki węgla, przy uwzględnieniu ograniczeń sieci powiązań produkcyjnych układu nadrzędnego. Dla rozpatrywanego układu nadrzędnego określono wpływ ograniczeń, w powiązaniach produkcyjnych na wyniki ekonomiczne produkcji. Analizy przeprowadzono dla jednej grupy charakterystyk węgla surowego (N0).

W przedstawianym artykule rozpatrzono przypadki, w których liczbę powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami ograniczono maksymalnie do dwóch. Analizę przeprowadzono dla trzech różnych rodzin charakterystyk węgla surowego każdej kopalni, oznaczonych jako N0 (bazowa) 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. Założenie to dotyczyło charakterystyk węgla surowego dla wszystkich rozpatrywanych kopalń. Przeprowadzono analizę, jaki wpływ na rozpatrywaną funkcję celu sterowania mają zakłócenia związane ze zmianą charakterystyk węgla surowego.

2. KRYTERIUM OPTYMALIZACJI SIECI POWIĄZAŃ GRUPY ZAKŁADÓW PRZERÓBKĄ WĘGLA Z ODBIORCAMI

Przyjęte kryterium optymalizacyjne ma postać:

$$\text{Max}\{Z\} = \text{Max}\left\{\sum_{i=1}^5 M_{ki}\right\} \quad (1)$$

z ograniczeniami nałożonymi na parametry jakościowe i ilościowe produktów:

$$\begin{aligned} A_k &\leq A_{k_zad}, \quad A_{m(j)} \leq A_{m(j)_zad} \\ M_{m(j)} &= M_{m(j)_zad} \end{aligned} \quad (2)$$

oraz ograniczeniami na powiązania produkcyjne pomiędzy zakładami i odbiorcami mieszanek energetycznych:

$$\begin{aligned} (i, j) &\leq (i_{\max}, j) \quad (i, j) \leq (i, j_{\max}) \\ \{i_{\max} &\leq 2, j_{\max} \leq 2\} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

Z – zysk [zł],

$M_{k(i)}$ – masa koncentratu *i-tego* produktu [Mg],

$M_{m(j)}$ – masa mieszanki energetycznej *j-tego* odbiorcy [Mg],

$A_{m(j)}$ – zawartość popiołu mieszanki energetycznej *j-tego* odbiorcy [%],

A_k – zawartość popiołu koncentratu na eksport [%].

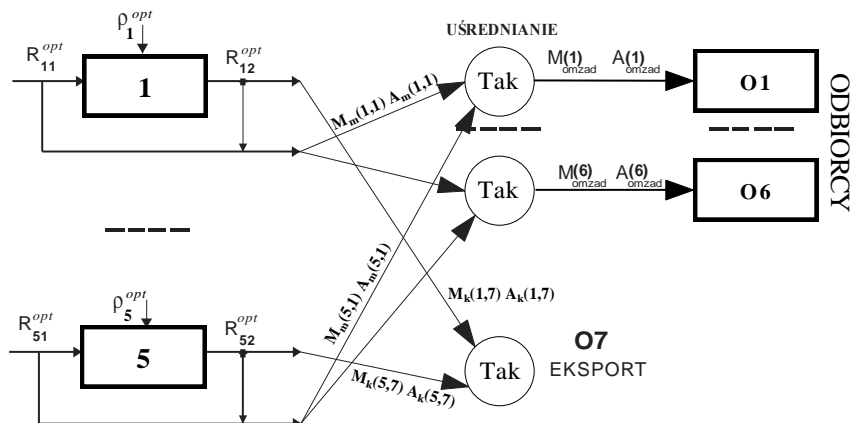
3. PRZYJĘTA DO ANALIZY STRUKTURA UKŁADU TECHNOLOGICZNEGO ZAKŁADÓW WZBOGACANIA WĘGLA

Często stosowaną w praktyce przemysłowej strukturą technologiczną, dla układów technologicznych wzbogacania węgla energetycznego, jest produkcja mieszanki w układzie wzbogacalnika grawitacyjnego (na przykład osadzarki), ze strugą mialu surowego bocznikującą osadzarkę. Na rysunku 1 przedstawiono uproszczoną strukturę technologiczną tworzenia mieszanek w zakładach wzbogacania oraz gdzie następuje uśrednianie produktów w centralnych obiektach.

W strukturze tej, w poszczególnym *i*-tym zakładzie wzbogacania, część nadawy kierowana jest do wzbogacalnika, a pozostała część do bocznika. Nadawę z bocznika miesza się z koncentratem z wzbogacalnika, w celu uzyskania mieszanki o odpowiedniej wartości zawartości popiołu $A_{m(i,j)}$. Mieszanka ta przeznaczona jest do utworzenia uśrednionej mieszanki *j*-tego odbiorcy, w centralnym obiekcie uśredniania. Pozostała część koncentratu, $M_k(i,7)$ o zawartości popiołu $A_k(i,7)$, kierowana jest do centralnego obiektu uśredniania koncentratów przeznaczonych na eksport. Uśredniona zawartość popiołu tego koncentratu powinna wynosić A_{kzad} .

Sformułowanie zagadnienia optymalizacji

Dla rozpatrywanego systemu nadrzędnego, składającego się z grupy pięciu zakładów wzbogacania i siedmiu odbiorców węgla (w tym sześciu energetyki zawodowej), model matematyczny zagadnienia można sformułować następująco: **należy wyznaczyć maksymalną ilość mieszanki koncentratów o określonej cenie przeznaczonych na eksport:**



Rys. 1. Uproszczony schemat technologiczny systemu grup zakładów i odbiorców węgla

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

przy spełnieniu następujących ograniczeń:

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

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

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

Ograniczenie (5) dotyczy zadanych wartości j -tych mieszanek energetycznych. Wyznaczone zostało w oparciu o bilans masowy. Wzory (6) i (7) są związane z ograniczeniami nałożonymi na parametry jakościowe produktów. Określono je w oparciu o bilans zawartości popiołu w składnikach tworzących odpowiednio mieszanki energetyczne i koncentrat na eksport.

$$M_n(i) \geq \sum_{j=1}^6 \frac{M_m(i, j)}{K(i, j)} + \frac{M_k(i, 7)}{w(i, 7)}; \quad i = 1, \dots, 5 \quad (8)$$

Przy czym:

$$K(i, j) = \frac{(A_s(i) - A_k(i, j))w(i, j)}{A_s(i) + A_m(i, j)(w(i, j) - 1) - A_k(i, j)w(i, j)} \quad (9)$$

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

Ograniczenie (8) dotyczy ilości wytworzonego koncentratu i mieszanki z masy węgla surowego $M_n(i)$ i -tego zakładu. Wyrażenie $K(i, j)$ oznacza

współczynnik wychodu mieszanki w procesie wzbogacania dwuproduktowego, z boczną strugą węgla. W przypadku, gdy cały węgiel surowy jest wzbogacany [wtedy $A_m(i, j) = A_k(i, j)$] i na podstawie wzoru (9) współczynnik $K(i, j) = w(i, j)$. Natomiast, gdy $w(i, j) = 1$ (we wzbogacalniku nie następuje wzbogacenie nadawy), wtedy współczynnik $K(i, j) = 1$. Oznacza to, że zawartość popiołu mieszanki z i -tego zakładu do j -tego odbiorcy jest równa zawartości popiołu w węglu surowym $A_m(i, j) = A_s(i, j)$.

W tym zagadnieniu do zmiennych decyzyjnych należy zaliczyć wychody koncentratów $w(i, j)$, $w(i, 7)$, zbiór wartości $M_m(i, j)$ oraz $M_k(i, 7)$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$).

Wartości $w(i, j)$, $A(i, j)$ wyznaczone są na podstawie odpowiednich charakterystyk ilościowo-jakościowych modeli układów technologicznych, uwzględniających charakterystyki nadawy i charakterystyki krzywych rozdziału wzbogacalników.

4. WYNIKI OBLICZEŃ OPTIMALIZACYJNYCH

W pracy przeprowadzono obliczenia optymalizacyjne dla funkcji celu (1) z ograniczeniami na parametry ilościowe i jakościowe (2). Założono, że w umowach handlowych wprowadzono dodatkowy warunek dotyczący liczby dostawców węgla do każdego odbiorcy (i, j). W analizach założono, że ograniczenia te dotyczą zarówno producentów jak i odbiorców (3). Liczba powiązań została ograniczona maksymalnie do dwóch. Analizy przeprowadzono dla trzech różnych grup nadaw (N0, N1, N2).

W tabeli 1 przedstawiono wyniki optymalizacji, przeprowadzonej dla ograniczeń produkcyjnych związanych z maksymalną liczbą dostawców i odbiorców węgla, przyjętą w umowie handlowej. Sytu-

Tabela 1

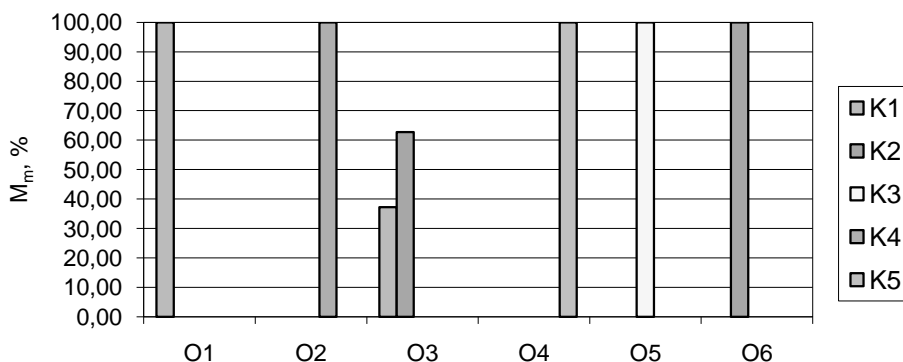
Wyniki obliczeń optymalizacyjnych

Optymalna sieć powiązań dla nadaw							Funkcja celu $\text{Max}\{Z\} = \sum_{i=1}^5 M_{ki}$
N0		N1		N2			
Obliczenia optymalizacyjne dla grup nadaw	$Z_{Ni}/Z_{N0}, \%$						$Z_{Ni}/Z_{N0}, \%$
	sieć powiązań ($j \leq 2, i \leq 2$)						sieć powiązań bez ograniczeń
N0	N0	98,10	N0_1	95,08	N0_2	95,50	100,00
N1	N1_0	116,80	N1	116,94	N1_2	115,75	118,58
N2	N2_0	77,31	N2_1	69,04	N2	78,66	80,46

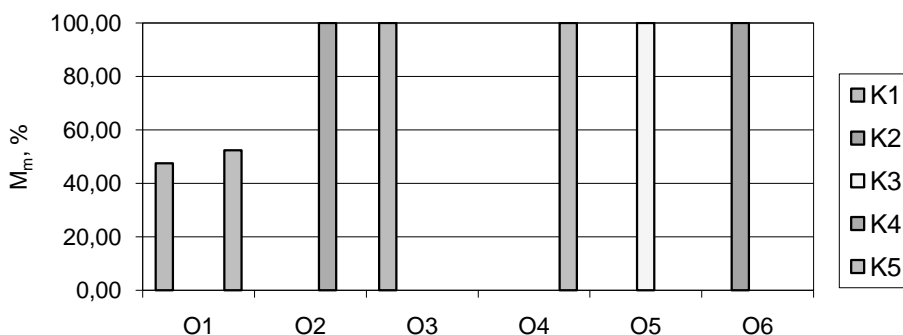
acja, w której odbiorcy mogą otrzymywać węgiel ze wszystkich kopalń, jest przypadkiem bez ograniczeń. Wartość funkcji celu, uzyskana w tym wariancie, jest wartością maksymalną. Dotyczy to wszystkich rozpatrywanych nadaw. Wyniki optymalizacji (funkcji celu sterowania) dla poszczególnych wariantów analizy przedstawiono procentowo. Punktem odniesienia była ilość (masa) koncentratu na eksport Z_{N0} uzyskana

w strukturze optymalnych powiązań produkcyjnych (bez ograniczeń), dla przypadku grup nadaw N0.

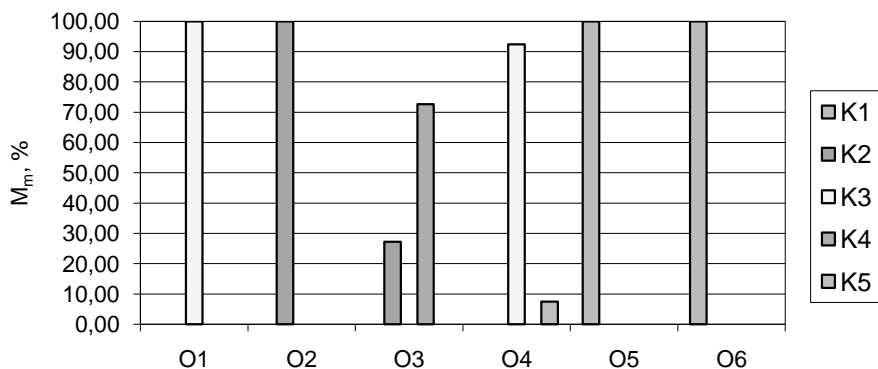
Na rysunkach 2-10 przedstawiono strukturę powiązań produkcyjnych uzyskanych dla różnych wariantów ograniczeń przedstawionych w tabeli 1. Przyjęto na wykresach oznaczenia, w których literą *O* oznaczono odbiorców energetyki zawodowej, natomiast literą *K* producentów węgla.



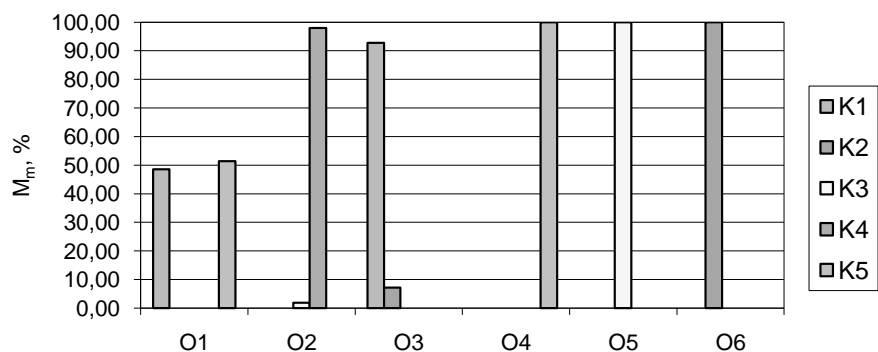
Rys. 2. Ilustracja optymalnych powiązań, pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, wyznaczonych dla nadawy N1, przy założeniu ograniczeń sieci powiązań $i_{max}, j_{max} \leq 2$



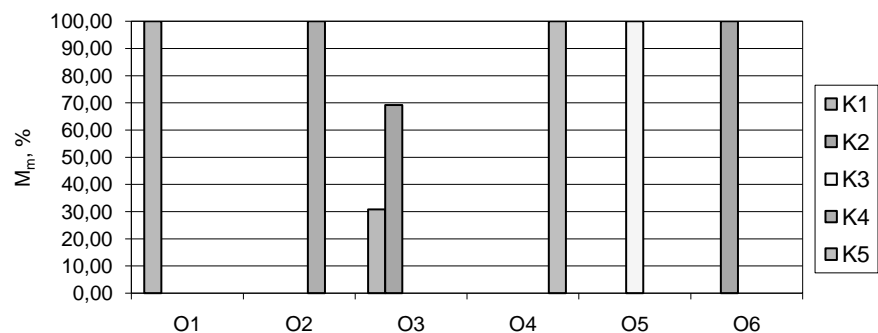
Rys. 3. Ilustracja powiązań, pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, wyznaczonych dla nadawy N1, przy założeniu ograniczeń sieci powiązań $i_{max}, j_{max} \leq 2$ oraz umów zawartych przy N0



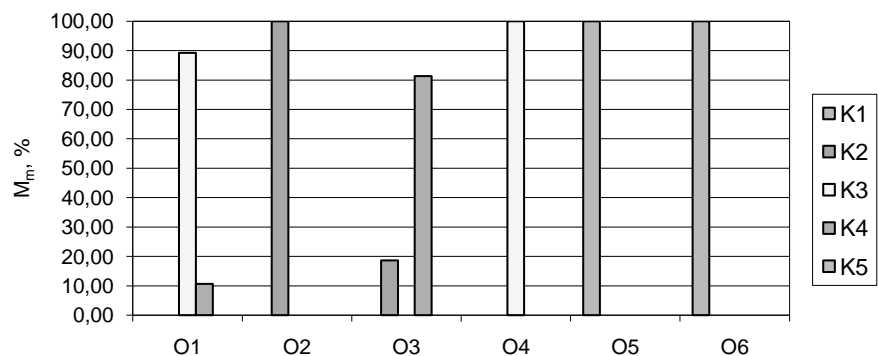
Rys. 4. Ilustracja powiązań, pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, wyznaczonych dla nadawy N1, przy założeniu ograniczeń sieci powiązań $i_{max}, j_{max} \leq 2$ oraz umów zawartych przy N2



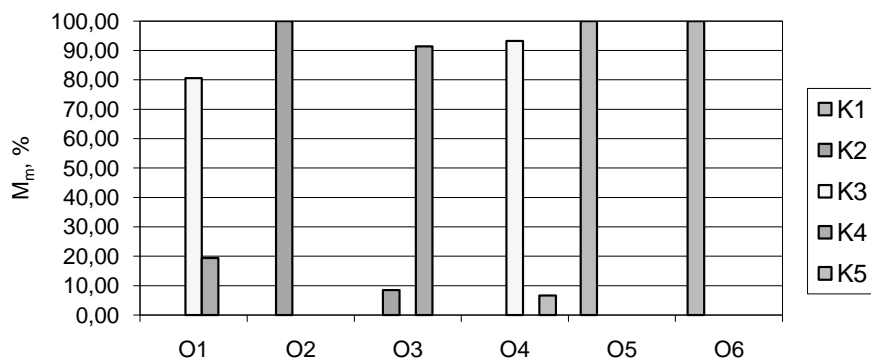
Rys. 5. Ilustracja optymalnych powiązań, pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, wyznaczonych dla nadawy N1, przy założeniu ograniczeń sieci powiązań $i_{max}, j_{max} \leq 2$



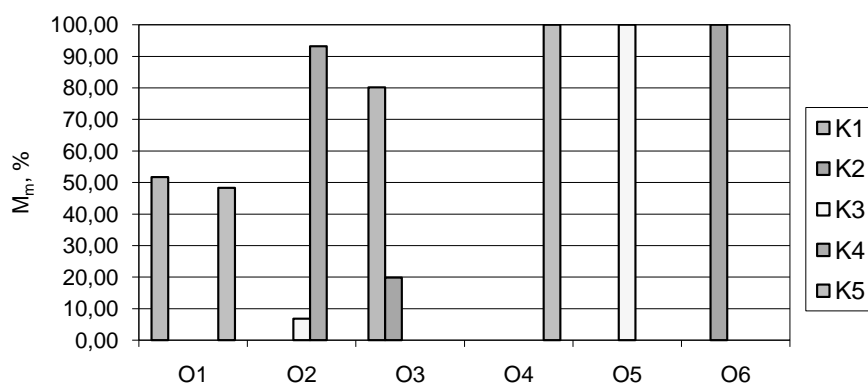
Rys. 6. Ilustracja powiązań, pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, wyznaczonych dla nadawy N0, przy założeniu ograniczeń sieci powiązań $i_{max}, j_{max} \leq 2$ oraz umów zawartych przy N1



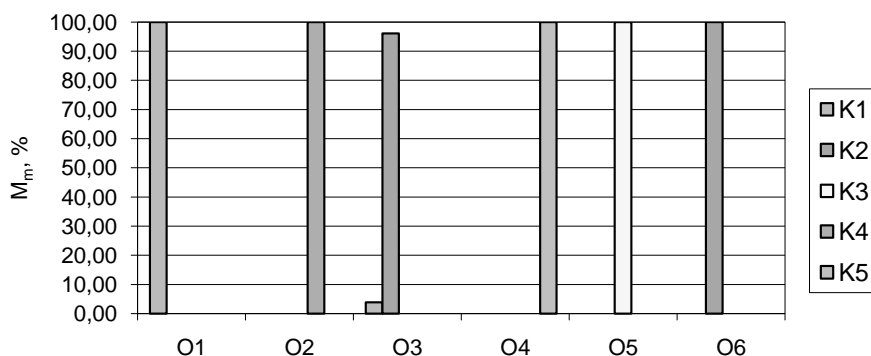
Rys. 7. Ilustracja powiązań, pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, wyznaczonych dla nadawy N0, przy założeniu ograniczeń sieci powiązań $i_{max}, j_{max} \leq 2$ oraz umów zawartych przy N2



Rys. 8. Ilustracja optymalnych powiązań, pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, wyznaczonych dla nadawy N2, przy założeniu ograniczeń sieci powiązań $i_{max}, j_{max} \leq 2$



Rys. 9. Ilustracja powiązań, pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, wyznaczonych dla nadawy N2, przy założeniu ograniczeń sieci powiązań $i_{max}, j_{max} \leq 2$ oraz umów zawartych przy N1



Rys. 10. Ilustracja powiązań, pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, wyznaczonych dla nadawy N2, przy założeniu ograniczeń sieci powiązań $i_{max}, j_{max} \leq 2$ oraz umów zawartych przy N0

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki analizy optymalizacji produkcji grupy zakładów przeróbki węgla. W przyjętym kryterium optymalizacji uwzględniono dodatkowe ograniczenia, związane ze strukturą powiązań produkcyjnych pomiędzy producentami i odbiorcami węgla. W rozpatrywanym układzie nadrzędnym (rys. 1) teoretycznie istnieje możliwość dostarczania produktów do każdego z odbiorców

energetyki zawodowej z wszystkich zakładów. W realizacji praktycznej taka sytuacja może być skomplikowana, nie tylko pod względem technologicznym, ale także logistycznym. Istotne jest zatem przeprowadzenie analizy, w której określi się wpływ ograniczeń związanych z liczbą maksymalnych powiązań produkcyjnych na wybraną funkcję celu (produkcję koncentratu na eksport). W przeprowadzonych obliczeniach przyjęto założenie, że maksymalna liczba powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla jest nie większa niż dwa. Wyni-

ki obliczeń odniesiono do przypadku, w którym możliwe są wszystkie powiązania produkcyjne pomiędzy producentami i odbiorcami (dla 5. zakładów oraz 6. odbiorców istnieje możliwość 30. więzów produkcyjnych). Obliczenia przeprowadzono dla trzech różnych rodzin charakterystyk węgla surowego (N0, N1, N2).

Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń (wartości pogrubione w tabeli 1), ilość koncentratu na eksport dla układu z ograniczoną liczbą powiązań produkcyjnych jest mniejsza o prawie 2% od wartości maksymalnej wyznaczonej dla układu bez ograniczeń produkcyjnych. Ma to miejsce dla każdego z wariantów optymalizacji dotyczących różnych charakterystyk węgla surowego (N0, N1, N2). Kolejnym etapem badań było określenie wpływu zmian charakterystyk węgla surowego na wyniki ekonomiczne produkcji. W obliczeniach przyjęto najgorszy z możliwych przypadków (czyli zmianę wszystkich charakterystyk węgla surowego równocześnie). Na przykład, dla optymalnego układu (o określonych umowach handlowych, tym samym sieci powiązań) wyznaczonego przy charakterystykach węgla surowego N0, przeprowadzono nowe obliczenie optymalizacyjne z charakterystykami N1 i N2. Analogiczne badania przeprowadzono z nadawami N1 i N0. Otrzymano w ten sposób dodatkowo sześć wariantów przedstawionych w tabeli 1. Najmniejsze różnice uzyskano dla układu z nadawami N1 (nadawy o najmniejszych wartościach średnich zawartości popiołu w węglu surowym). Największe różnice w funkcji celu otrzymano dla przypadku, w którym dla optymalnej struktury powiązań produkcyjnych wyznaczonej dla grup nadaw N2 (nadawy o największych wartościach średnich popiołu w węglu surowym), nastąpi zmiana charakterystyk węgla surowego na N1. Odpowiada to przypadkowi N2_1 w tabeli 1. Różnica ta wynosi ponad 9%. Celowa zatem, w układzie sterowania nadrzędnego grupy kopalń byłaby okresowa weryfikacja przyjętych założeń produkcyjnych dotycząca umów długoterminowych.

Wyniki pracy mogą być wykorzystane przy projektowaniu nadrzędnego systemu sterowania grupy zakładów przeróbki węgla. W systemie tym uwzględniona powinna być, w algorytmie wielokryterialnej optymalizacji produkcji, analiza wrażliwości dotycząca wpływu różnych zakłóceń występujących w procesie produkcyjnym.

Literatura

1. *Cierpisz S., Kalinowski K., Kaula R., Pielot J.*: Maksymalizacja wartości produkcji sortymentów handlowych węgla o zadanych wartościach opałowych w układzie grupy kopalń. Materiały XII Konferencji „Automatyzacja Procesów Przeróbki Kopalni”, Szczyrk, 31 maj – 2 czerwca 2006, str. 53-64.

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. *Cierpisz S., Kalinowski K., Kaula R., Pielot J.*: Analiza produkcji grupy zakładów wzbogacania węgla w warunkach zmiennej jakości wydobywanego węgla surowego. *Kwartalnik Górnictwo i Geologia*, tom 1, nr 4, 2006, str. 19-31.
4. *Kalinowski K., Kaula R.*: Optymalizacja sieci powiązań układu nadrzędnego grupy kopalń ze względu na koszty transportu. *Materiały XIV Konferencji Automatyzacja Procesów Przeróbki Kopalni APPK 2008. Seria Sympozja i Konferencje*. Wyd. nakładem Katedry Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa, Szczyrk 2008, str. 95-103.
5. *Kalinowski K., Kaula R.*: Zagadnienie transportowe w optymalizacji produkcji grupy zakładów przeróbki węgla. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo*, z. 286, str. 285-292, Gliwice 2008.
6. *Kalinowski K., Kaula R.*: Optymalizacja produkcji grupy zakładów przeróbki węgla przy uwzględnieniu ograniczeń dotyczących sieci powiązań produkcyjnych układu nadrzędnego. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2010*, nr 1, str. 25-29.

Recenzent: dr inż. Joachim Pielot