

## Optymalizacja sieci powiązań układu nadrzędnego grupy kopalń ze względu na koszty transportu

*Artykuł dotyczy zagadnień sterowania nadrzędnego procesów przeróbki węgla w układzie grupy kopalń. W opracowaniu zostały przedstawione wyniki analizy optymalizacyjnej, dotyczącej sieci powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla, w której uwzględniono dodatkowo wpływ kosztów transportu na końcowy wynik ekonomiczny. Badania przeprowadzono metodami symulacyjnymi. Podstawę badań stanowiły: modele statyczne układów technologicznych wzbogacania węgla oraz model całkowity układu sterowania nadrzędnego produkcji grupy zakładów przeróbki węgla.*

### 1. WSTĘP

---

W Katedrze Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej od kilku lat prowadzone są analizy dotyczące zagadnień sterowania i optymalizacji produkcji grupy zakładów przeróbki węgla [3]. Z punktu widzenia sterowania produkcją, grupa zakładów przeróbki węgla 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.

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, 2, 3].

Uzyskać przy tym można istotny wzrost ilości (masy) produktów z tej samej wyjściowej masy nadawców surowych w poszczególnych zakładach

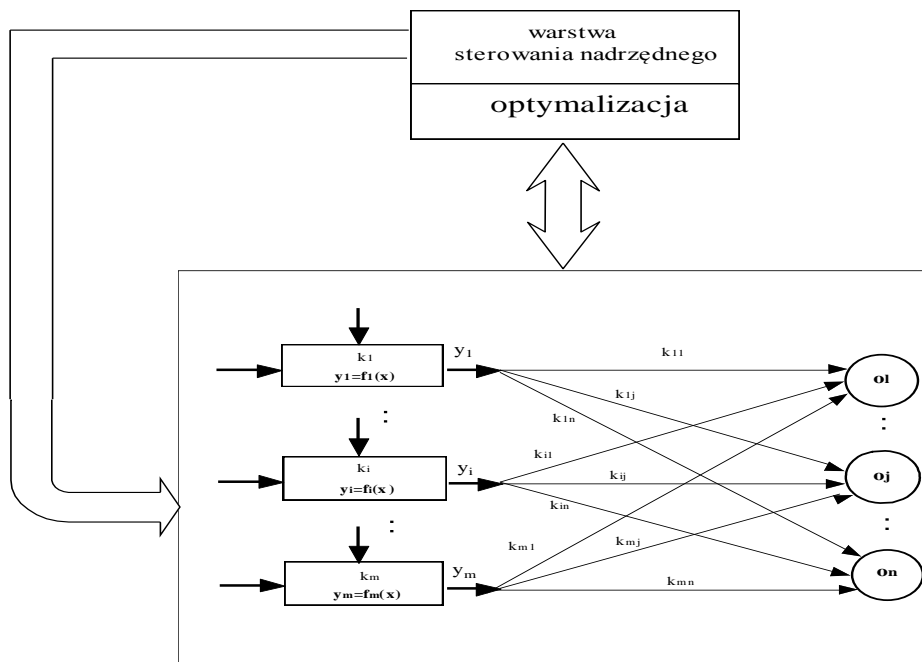
w stosunku do powiązań stosowanych w praktyce. Efekty te zależą od przyjętego kryterium optymalizacji oraz ograniczeń wprowadzonych w ustalonych planach produkcyjnych dla poszczególnych kopalń.

### 2. KRYTERIUM OPTIMALIZACJI SIECI POWIĄZAŃ GRUPY KOPALŃ Z ODBIORCAMI

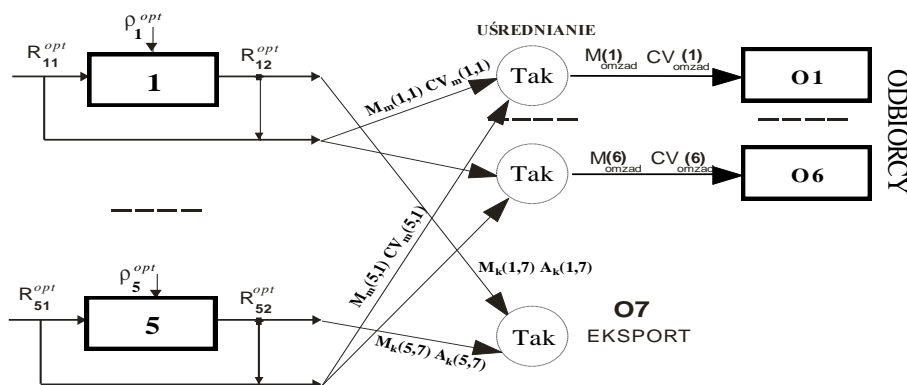
---

W monografii [3] przedstawiono wyniki wielu analiz dotyczących optymalizacji produkcji grupy kopalń przy określonych kryteriach optymalizacyjnych. W niniejszym artykule przeprowadzono analizę uwzględniania wpływu kosztów transportu w kryterium optymalizacyjnym na optymalną strukturę powiązań producent – odbiorca. W poniżej podanych analizach ograniczono się do zawartości popiołu w produkcie na eksport oraz wartości opałowej mieszanek energetycznych jako podstawowych parametrów jakościowych z uwzględnieniem kosztów transportu. Założono także, że spełnione są powiązania produkcyjne zakładów przerobczych z odbiorcami energetyki zawodowej. Wobec tego przyjęte, w pracy, kryterium optymalizacyjne ma postać:

$$\text{Max}\{Z\} = \text{Max}\left\{ \sum_{i=1}^n (M_{kj}c - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m kT_{ij}M_{m_{ij}}) \right\} \quad (1)$$



Rys. 1. Schemat powiązań układu nadrzędnego przeróbki węgla



Rys. 2. Uproszczony schemat technologiczny systemu grupy zakładów i odbiorców węgla dla wariantu I.A

z ograniczeniami nałożonymi na parametry jakościowe i ilościowe produktów:

$$A_k \leq A_{k\_zad}, CV_m \geq CV_{m\_zad}$$

$$M_m = M_{m\_zad} \quad (2)$$

gdzie:

- Z – zysk (zł),
- $M_{m(k),j}$  – masa mieszanki energetycznej (koncentratu)  $j$ -tego produktu, Mg,
- $c$  – cena jednostkowa koncentratu, zł/Mg,
- $k$  – koszty jednostkowe transportu produktów, zł/(Mg·km),
- $T_{i,j}$  – odległość  $j$ -tego odbiorcy od  $i$ -tego, km,
- $A_k$  – zawartość popiołu koncentratu na eksport, %,
- $CV_{m,j}$  – wartość opałowa  $j$ -tego produktu mieszanki, kJ/kg.

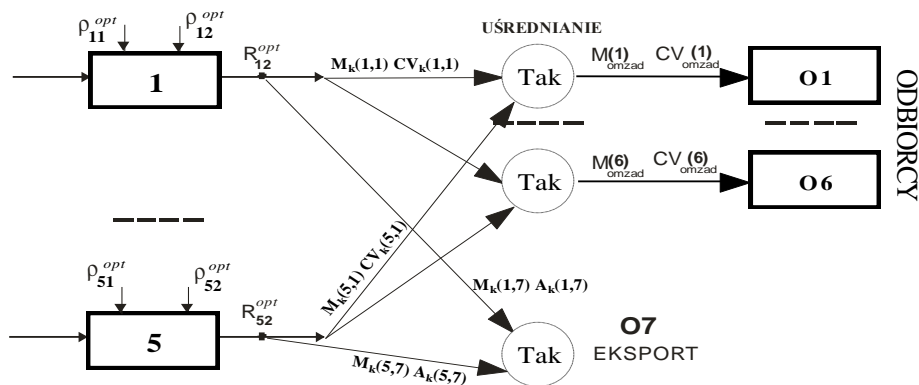
### 3. ROZPATRYWANE UKŁADY TECHNOLOGICZNE ZAKŁADÓW PRZERÓBKI WĘGLA

W pracy przeprowadzono analizy dla dwóch struktur technologicznych procesu wzbogacania:

- dwuproduktowego wzbogacania z boczną strugą węgla,
- posobnego wzbogacania węgla.

#### 3.1. Wzbogacanie dwuproduktowe z boczną strugą węgla – wariant I A

Na rys. 2 pokazano strukturę, gdzie tworzone są mieszanki w zakładach wzbogacania oraz dodatkowo następuje uśrednianie produktów w centralnych obiektach. W strukturze tej w poszczególnym  $i$ -tym zakładzie wzbogacania część nadawy kierowana jest do o-



Rys. 3. Uproszczony schemat technologiczny systemu grupy zakładów i odbiorców węgla dla wariantu III.A

dzarki, a pozostała część do bocznika. Nadawę z bocznika miesza się z koncentratem z osadzarki w celu uzyskania mieszanki o odpowiedniej wartości opalowej  $CV_m(i, j)$ . Mieszanka ta przeznaczona jest do utworzenia uśrednionej mieszanki  $j$ -tego odbiorcy w jego 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  $A_{kzad}$ .

Analizę tego wariantu wykonano dla dwóch przypadków: w pierwszym założono produkcję koncentratów o zawartości popiołu nie przekraczającej 10% (wariant I.A1), a w drugim przy dowolnej zawartości popiołu w koncentracie (wariant I.A2).

### 3.2. Posobne wzbogacanie węgla – wariant III.A

Na rys. 3 pokazano strukturę, gdzie tworzony jest w zakładach wzbogacania koncentrat z węgla wzbogaconego w osadzarce.

W strukturze tej w poszczególnym  $i$ -tym zakładzie zakłada się produkcję koncentratu o masie  $M_k(i, j)$  kierowanego do obiektu uśredniania, by po uśrednieniu wartość opałowa z poszczególnych zakładów nie przekraczała wartości zadanej  $CV_{omzad}(j)$   $j$ -tego odbiorcy oraz zakłada się produkcję koncentratu  $M_k(i, 7)$  o zawartości popiołu  $A_k(i, 7)$ , który kierowany jest do centralnego obiektu uśredniania koncentratów przeznaczonych na eksport. Uśredniona zawartość popiołu tego koncentratu powinna wynosić  $A_{kzad}$ .

## 4. WYNIKI OBLICZEŃ OPTIMALIZACYJNYCH

W pracy założono, że dostawy węgla będą realizowane transportem samochodowym. Przyjęto, stosowa-

wany w rozliczeniach dostawca–odbiorca, współczynnik  $k$  określający koszty transportu 1 tony węgla na 1 kilometr. Założono wartość bazową  $k = 0,1$  zł/(Mg · km). W obliczeniach przyjęto (jako wartość bazową), cenę 1 tony koncentratu na eksport równą  $c = 320$  zł.

W tabeli 1 przedstawiono odległości  $T_{ij}$  (w kilometrach) przyjęte do obliczeń pomiędzy kopalniami i odbiorcami. Dane te odzwierciedlają rzeczywistą strukturę drogowych powiązań pomiędzy kopalniami i odbiorcami energetyki zawodowej.

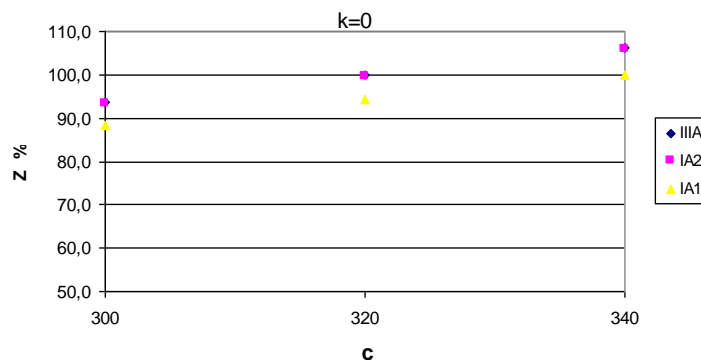
Tabela 1

Odległość  $T_{ij}$  pomiędzy  $i$ -tą kopalnią  $j$ -tym odbiorcą

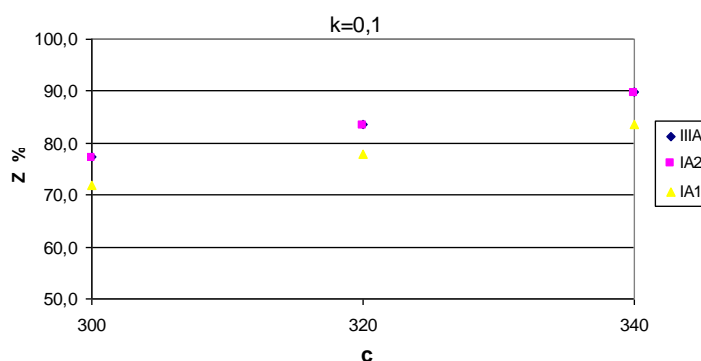
	O1	O2	O3	O4	O5	O6
K1	18	108	663	183	116	676
K2	34	101	656	176	109	645
K3	28	104	659	179	109	669
K4	17	108	662	182	117	677
K5	35	111	666	186	100	660

Na całkowite koszty transportu składa się suma kosztów pojedynczych kontraktów  $i$ -tego producenta –  $j$ -tym odbiorcą. Koszty transportowe pojedynczego kontraktu są określone jako iloczyn ilości dostarczonych ton mieszanki energetycznej  $M_{m_{ij}}$  oraz odległości  $T_{ij}$  i kosztów  $k$ .

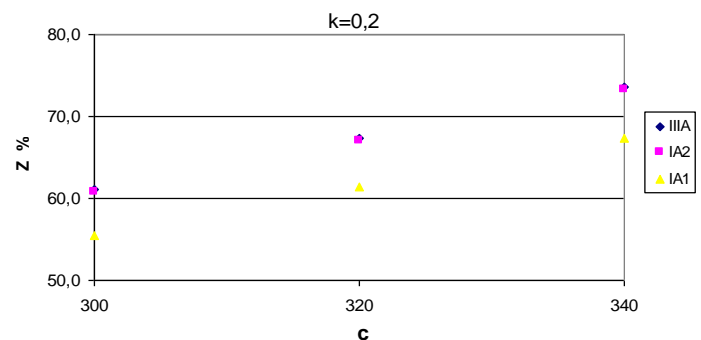
Na rys. 4-6 przedstawiono wyniki optymalizacji przeprowadzonej dla kryterium maksymalnego zysku (wzór 4). Dla porównania przeprowadzono także obliczenia dla wartości:  $k = 0,2$  i  $k = 0$  oraz  $c = 300$  i  $340$ . Otrzymano w ten sposób krzywe zależności  $Z_{max} = f(k, c)$ . Dla łatwiejszej ilustracji wyniki zaprezentowano w procentach. Wartością odniesienia ( $Z = 100\%$ ) przyjęto przypadek  $Z = f(0; 320)$  dla wariantu struktury technologicznej wzbogacania posobnego (wariant III.A).



Rys. 4. Ilustracja zmian wartości przyjętego kryterium optymalizacyjnego w rozpatrywanych układach technologicznych, przy różnych cenach koncentratu węglowego  $c$  i współczynnika kosztów transportu  $k=0$



Rys. 5. Ilustracja zmian wartości przyjętego kryterium optymalizacyjnego w rozpatrywanych układach technologicznych, przy różnych cenach koncentratu węglowego  $c$  i współczynnika kosztów transportu  $k=0,1$

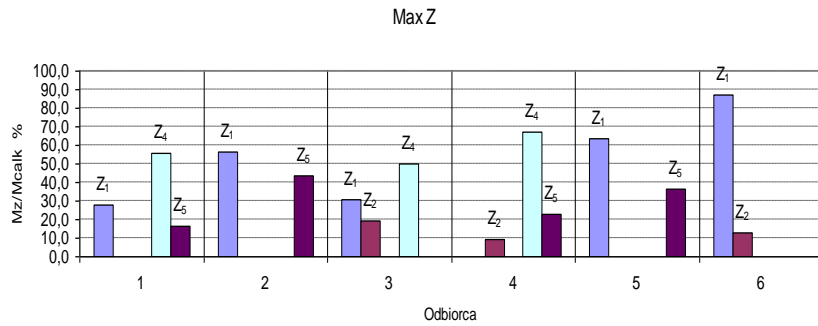


Rys. 6. Ilustracja zmian wartości przyjętego kryterium optymalizacyjnego w rozpatrywanych układach technologicznych, przy różnych cenach koncentratu węglowego  $c$  i współczynnika kosztów transportu  $k=0,2$

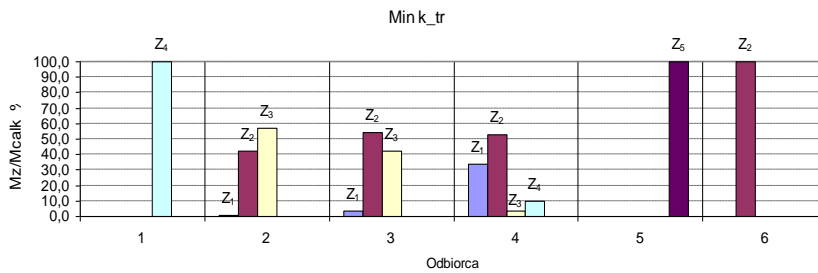
Jak widać z analizy rys. 4-6 zależność maksymalnego zysku ( $Z_{max} = f(c,k)$ ) od kosztów transportu i ceny koncentratu węglowego ma charakter liniowy. Przy przyjętych w pracy drogowych powiązaniach producent-odbiorca (tabela 1), uwzględnienie kosztów transportu  $k = 0,1$  zł (Mg/km) powoduje zmniejszenie wartości przyjętego kryterium optymalizacyjnego o kilkanaście procent w stosunku do przypadku  $k = 0$ . Przypuszcza się, że ta liniowa zależność związana jest z koncentracją producentów węgla (rozpatrywane kopalnie są usytuowane w niewielkiej odległości od siebie i znacznej odległości od odbiorców).

Wykonano również obliczenia dla warunku optymalizacyjnego minimalnych kosztów transportu (we wzorze 3 uwzględniono tylko składnik kosztów  $Min\{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m kT_{ij}M_{m_{ij}}\}$ ).

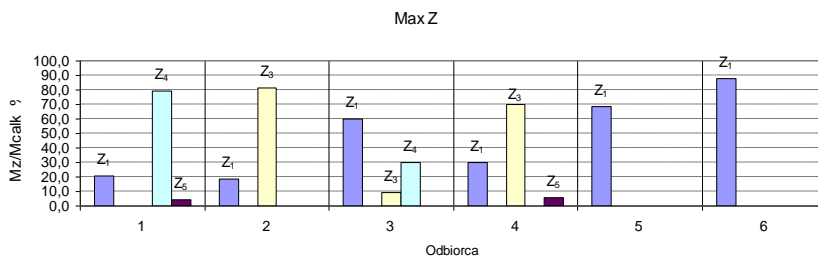
Porównanie struktury optymalnych powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla dla poszczególnych wariantów analizy (przyjęte kryteria: maksymalnego zysku i minimalnych kosztów transportu przy różnych strukturach technologicznych) przedstawiono na rys. 7-12.



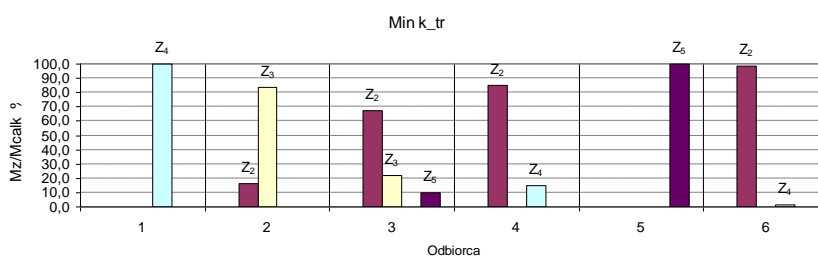
Rys. 7. Ilustracja optymalnych powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla systemu grupy zakładów i odbiorców dla wariantu I.A1, przy założeniu  $c=320$ ,  $k=0,1$  oraz przyjętym kryterium maksymalizacji zysku



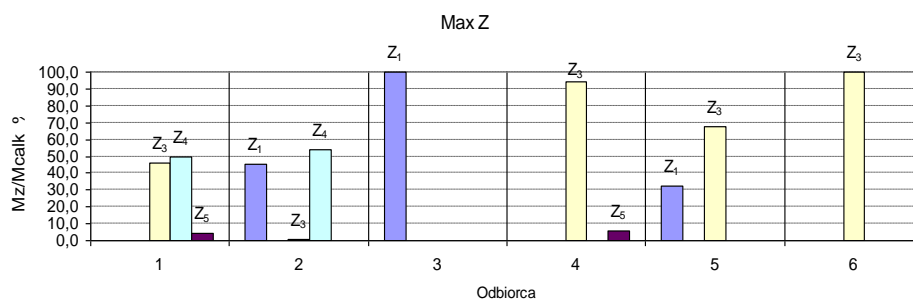
Rys. 8. Ilustracja optymalnych powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla systemu grupy zakładów i odbiorców dla wariantu I.A1, przy założeniu  $k=0,1$  oraz przyjętym kryterium minimalizacji kosztów transportu



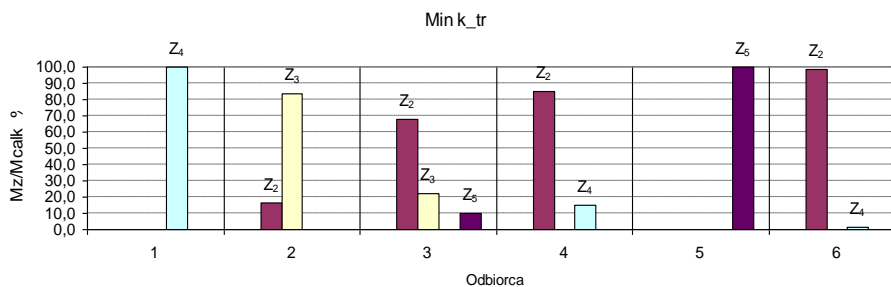
Rys. 9. Ilustracja optymalnych powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla systemu grupy zakładów i odbiorców dla wariantu I.A2, przy założeniu  $c=320$ ,  $k=0,1$  oraz przyjętym kryterium maksymalizacji zysku



Rys. 10. Ilustracja optymalnych powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla systemu grupy zakładów i odbiorców dla wariantu I.A2, przy założeniu  $k=0,1$  oraz przyjętym kryterium minimalizacji kosztów transportu



Rys. 11. Ilustracja optymalnych powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla systemu grupy zakładów i odbiorców dla wariantu III.A, przy założeniu  $c=320$ ,  $k=0,1$  oraz przyjętym kryterium maksymalizacji zysku



Rys. 12. Ilustracja optymalnych powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla systemu grupy zakładów i odbiorców dla wariantu III.A, przy założeniu  $k=0,1$  oraz przyjętym kryterium minimalizacji kosztów transportu

W każdym z wybranych wariantów, przyjętych w analizie struktur technologicznych, liczba powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla jest nieznacznie mniejsza dla kryterium minimalnych kosztów transportu ( $\min k_{tr}$ ) w odniesieniu do liczby powiązań uzyskanych przy kryterium maksymalnego zysku ( $\max Z$ ). Oczywiście zatem jest, że koszty transportu uzyskane dla kryterium maksymalizacji zysku są większe niż dla kryterium minimalizacji kosztów transportu. Jednak różnica ta nie przekracza 1,5%. Porównując zysk, wyznaczony według wzoru 1, można zauważyć, że kryterium maksymalnego zysku daje rezultaty około 10% lepsze niż stosując kryterium minimalnych kosztów transportu.

## 5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki wielowymiarowej analizy symulacyjnej dotyczącej optymalizacji produkcji sieci powiązań grupy kopalń z odbiorcami, przy warunku ograniczającym na wartość opałową, z uwzględnieniem kosztów transportu produktów mieszanek energetycznych. Przyjęte w analizie kryterium optymalizacyjne składa się z dwóch zasadniczych składników: wartości produktu ( $\sum_{i=1}^n (M_{kj}c)$ ) oraz całkowitych kosztów transportu produktów do odbiorców energetyki ( $-\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m kT_{ij}M_{m-ij}$ ). Przyjmując zerowe koszty transportu (wartość  $k=0$ ) maksymalizuje się tylko wartość produkcji koncentratów przy spełnieniu pozostałych ograniczeń na parametry ilościowo-jakościowe. Dodatkowo, przy  $c=1$ , maksymalizuje się tylko ilość koncentratu. W drugim przypadku, (przyjmując  $c=0$ ) rozpatruje się tylko minimalizację kosztów transportu w sieci powiązań grupy kopalń z odbiorcami. Ze względu na liniowe zależności  $Z_{max}=f(c,k)$  (rys. 4-6) obliczenia optymalizacyjne sieci powiązań grupy kopalń z odbiorcami wystarczy przeprowadzić jednorazowo dla  $Z_{max}=f(c=1, k=0)$ .

Wobec tego  $Z_{max}$  dla innych wartościach  $c$  i  $k$  można wyznaczyć stosując wzór

$$Z_{max}(c,k) = cZ_{max}(1,0) - k\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij}M_{m-ij}\right).$$

Stosując kryterium maksymalizacji zysku, optymalna sieć powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla nie zależy praktycznie od kosztów transportu węgla. Fakt ten związany jest z niewielką wzajemną odległością producentów węgla (rozpatrywanej grupy kopalń) w odniesieniu do odbiorców energetyki zawodowej.

W każdym z wybranych wariantów, przyjętych w analizie struktur technologicznych, liczba powiązań pomiędzy producentami i odbiorcami węgla jest nieznacznie mniejsza dla kryterium minimalnych kosztów transportu ( $\min k_{tr}$ ) w odniesieniu do liczby powiązań uzyskanych przy kryterium maksymalnego zysku ( $\max Z$ ).

Koszty transportu uzyskane dla kryterium maksymalizacji zysku są większe niż dla kryterium minimalizacji kosztów transportu. Jednak różnica ta nie przekracza 1,5%. Porównując zysk, wyznaczony według wzoru 3, można zauważyć, że kryterium maksymalnego zysku daje rezultaty około 10% lepsze niż stosując kryterium minimalnych kosztów transportu.

## Literatura

1. Cierpisz S., Kalinowski K., Kaula R., Pielot J.: Zastosowanie modeli symulacyjnych w optymalizacji produkcji grupy zakładów wzbogacania węgla. Konferencja KOMKO: „Innowacyjne systemy przeróbki surowców mineralnych”, Szczyrk, 21-23 marzec 2006.
2. 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.
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. 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.
5. Kalinowski K., Kaula R.: Optymalizacja sieci powiązań grupy kopalń z odbiorcami węgla ze względu na koszty transportu węgla. Badania statutowe nr BK – 267/RG-1/2007, (Praca niepublikowana).

Recenzent: prof. dr hab. inż. Stanisław Cierpisz