



POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

**ROZWÓJ I ZASTOSOWANIA
TECHNOLOGII I SYSTEMÓW
INFORMATYCZNYCH**

pod redakcją:

Jana Studzińskiego

Ludostawa Drelichowskiego

Olgierda Hryniewicza



**ROZWÓJ I ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII
I SYSTEMÓW INFORMATYCZNYCH**

Polska Akademia Nauk • Instytut Badań Systemowych

Seria: BADANIA SYSTEMOWE
tom 28

Redaktor naukowy:

Prof. dr hab. Jakub Gutenbaum

Warszawa 2001

ROZWÓJ I ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII I SYSTEMÓW INFORMATYCZNYCH

pod redakcją

Jana Studzińskiego, Ludosława Drelichowskiego
i Olgierda Hryniewicza

Wydano z wykorzystaniem dotacji KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH

Książka zawiera wybór artykułów poświęconych omówieniu aktualnego stanu badań w kraju w zakresie rozwoju technologii, modeli i systemów informatycznych oraz ich zastosowań w różnych dziedzinach gospodarki narodowej. Wyodrębnioną grupę stanowią artykuły aplikacyjne omawiające wyniki projektów badawczych i celowych KBN.

Recenzenci artykułów:

Dr hab. inż. Ryszard Budziński, prof. US

Prof. dr hab. inż. Janusz Kacprzyk

Dr hab. Adam Kopiński, prof. AE we Wrocławiu

Doc dr hab. inż. Marek Libura

Prof. dr hab. inż. Andrzej Straszak

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2001

ISBN 83-85847-59-6

ISSN 0208-8028

Rozdział 5

**Modele i systemy wspomagania decyzji
w zarządzaniu i technice**

SYSTEM WSPOMAGANIA DECYZJI WYBORU METODY REDUKCJI EMISJI SO₂ W SKALI REGIONU

Piotr Holnicki, Andrzej Kałuszko

Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa

W artykule przedstawiono system wspomaganie decyzji dotyczący wyboru optymalnej strategii inwestowania w technologie ograniczenia emisji SO₂ w regionie, w wybranej grupie źródeł energetyki zawodowej. Strategia optymalizacji oparta jest na minimalizacji wskaźnika strat środowiskowych, przy ograniczeniach na całkowity, roczny koszt przeprowadzenia operacji, uwzględniający koszty inwestycyjne oraz eksploatację instalowanych technologii odsiarczania spalin.

Zaproponowano heurystyczny algorytm alokacji środków oraz optymalnego wyboru technologii odsiarczania spalin w poszczególnych zakładach. Umożliwia on wybór odpowiedniej technologii dla każdej elektrowni, przy równoczesnym uwzględnieniu ograniczeń finansowych. Opracowano implementację komputerową algorytmu, którą testowano na zespole wybranych zakładów energetyki zawodowej w regionie Górnego Śląska..

1. Wstęp

W ostatnich latach można zaobserwować w Polsce starania zmierzające do poprawy stanu środowiska naturalnego, szczególnie jakości powietrza i wód powierzchniowych. Te starania są uwarunkowane dwoma głównymi czynnikami:

- wzrostem świadomości społecznej w dziedzinie ochrony środowiska naturalnego, przekładającym się na poparcie wszelkich przedsięwzięć mających na celu poprawę jakości środowiska,
- koniecznością dostosowania stanu środowiska, a przede wszystkim powietrza, do norm obowiązujących w Unii Europejskiej.

Degradacja jakości powietrza w Polsce ma przyczyny w wieloletnich zaniedbaniach w zakresie redukcji emisji zanieczyszczeń przy jednoczesnym ogromnym rozwoju przemysłu ciężkiego, zwłaszcza hutnictwa i energetyki, używającej węgla kamiennego i brunatnego o dużej zawartości siarki. Podstawowym problemem z punktu widzenia ograniczenia emisji SO₂ jest więc modernizacja sektora energetyki (Alcamo et al., 1990; Dernwent, 1988).

W dalszym ciągu będziemy rozważać problem wyznaczenia strategii redukcji emisji w wybranym regionie, tzn. alokacji posiadanych zasobów finansowych do wybranych obiektów w zadanym horyzoncie czasowym.

2. Sformułowanie zadania

Rozważane w pracy zadanie polega na minimalizacji funkcji opisującej straty środowiskowe, przez odpowiedni wybór technologii ograniczającej emisję SO_2 w źródłach oddziaływujących na dany obszar. Analiza jest oparta na założeniu liniowej zależności koncentracji dwutlenku siarki pochodzącej z danego źródła od wielkości jego emisji. Takie założenie pozwala dla każdego źródła wyznaczyć w trybie off-line macierz relacji emisja-koncentracja. Macierze takie określają rozkład koncentracji zanieczyszczeń w regionie w odniesieniu do jednostkowej emisji każdego ze źródeł i są następnie wykorzystywane w procedurze wyboru technologii odsiarczania..

Zakładamy, że w regionie Ω jest N rozpatrywanych źródeł emisji SO_2 i dodatkowo pewna liczba mniejszych źródeł punktowych i powierzchniowych, tworzących tło koncentracji. Dysponujemy ponadto M technologiami redukcji emisji, przy czym każda z tych technologii jest charakteryzowana przez efektywność redukcji emisji i jednostkowe koszty (na jednostkę emisji) inwestycji i eksploatacji.

Nasze zadanie polega na znalezieniu zestawu technologii redukcji emisji we wszystkich rozpatrywanych obiektach, minimalizującego straty środowiskowe przy ograniczeniu na koszty inwestycji i eksploatacji technologii odsiarczania w zadanym okresie T . Używamy następujących oznaczeń:

$\Omega = L_x \times L_y$ -- rozpatrywany region (prostokąt),

N -- liczba rozpatrywanych źródeł,

M -- liczba dostępnych technologii,

$T = K \cdot \Delta t$ -- horyzont czasowy analizy, gdzie Δt wynosi jeden rok,

C_k -- ograniczenie na koszty całkowite w k -tym kroku czasowym, $k \leq K$,

$\vec{u} = [u_1, u_2, \dots, u_N]$ -- wektor emisji źródeł,

$\vec{e} = [e_1, e_2, \dots, e_M]$ -- wektor efektywności technologii,

$X = \{x_{ij}\}$, $1 \leq i \leq N$, $1 \leq j \leq M$ -- macierz "0-1" wyboru technologii (zmienne decyzyjne).

Funkcja strat środowiskowych, umożliwiająca porównywanie różnych scenariuszy redukcji emisji zanieczyszczeń, jest opisana w następujący sposób:

$$J(d) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} w(x, y) [\max(0, d(x, y) - d_{ad})]^2 d\Omega \quad (1)$$

gdzie:

$w(x, y)$ -- funkcja wrażliwości (wagi) terenu,

d_{ad} -- dopuszczalny poziom koncentracji SO_2 .

Prognoza koncentracji zanieczyszczeń jest wyznaczana z zależności:

$$d(x, y) = d_0(x, y) + \sum_{i=1}^N A_i(x, y) \cdot u_i, \quad (x, y) \in \Omega, \quad (2)$$

gdzie:

$d_0(x, y)$ -- koncentracja pochodząca ze źródeł niesterowanych (tło),

$A_i(x, y)$ -- macierz przejścia (relacja emisja \rightarrow koncentracja) i -tego źródła.

Bieżąca intensywność emisji i -tego źródła zależy od emisji początkowej i efektywności zastosowanej technologii redukcji emisji:

$$u_i = u_i^0 \sum_{j=1}^N (1 - e_j) \cdot u_j, \quad \sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, \quad x_{ij} \in \{0,1\}, \quad 1 \leq i \leq N, \quad (3)$$

gdzie:

u_i -- bieżąca emisja i -tego źródła,

u_i^0 -- początkowa emisja i -tego źródła.

Macierz $A_i(x, y)$ reprezentuje udział i -tego źródła w sumarycznym polu koncentracji, odnoszący się do jednostkowej wartości jego emisji. Wszystkie macierze $A_i(x, y)$ ($i=1, \dots, N$) są wyznaczane dla zadanego scenariusza meteorologicznego w trybie off-line, tzn. przed rozpoczęciem procesu alokacji.

Koszt redukcji emisji (zastosowania wybranej technologii) składa się z dwu części:

- kosztów inwestycji (globalnych) -- f_{ij}^1 ,
- kosztów eksploatacji (rocznych) -- f_{ij}^2 .

Zakładamy przy tym, że obydwa rodzaje kosztów zależą od wielkości emisji, tzn. są podane na jednostkę emisji. Ponadto

$$f_{ij}^1 = \sum_{k=1}^K f_{ijk}^1, \quad 1 \leq i \leq N, \quad 1 \leq j \leq M, \quad (4)$$

gdzie f_{ijk}^1 oznacza koszty inwestycyjne dla i -tego źródła oraz j -tej technologii w kroku czasowym k . Inwestycje dla i -tego źródła zaczynają się w kroku k_i oraz kończą w kroku K_i :

$$f_{ijk}^1 \begin{cases} > 0 & \text{dla } k_i \leq k \leq K_i, \\ = 0 & \text{dla } k < k_i \text{ oraz } k > K_i. \end{cases} \quad (5)$$

Eksploatacja zaczyna się w kroku $K_i + 1$, tzn.

$$f_{ijk}^2 = \begin{cases} 0 & \text{dla } k \leq K_i, \\ f_{ij}^2 & \text{dla } k > K_i. \end{cases} \quad (6)$$

Całkowity koszt redukcji emisji (koszt inwestycyjny i eksploatacyjny) w k -tym kroku czasowym dla i -tego źródła wynosi:

$$c_{ik} = u_i^0 \sum_{j=1}^M (f_{ijk}^1 + f_{ijk}^2) x_{ij}. \quad (7)$$

Całkowite koszty dla wszystkich źródeł w k -tym kroku czasowym są ograniczone przez C_k :

$$\sum_{i=1}^N c_{ik} \leq C_k. \quad (8)$$

Możemy teraz sformułować problem alokacji inwestycji dla poszczególnych źródeł emisji w następujący sposób:

ZADANIE ALOKACJI: Określić zbiór technologii ograniczenia emisji

$$X^* = \{x_{ij}^* \in \{0,1\} : \sum_{j=1}^M x_{ij}^* = 1, \quad 1 \leq i \leq N, \quad 1 \leq j \leq M\},$$

w taki sposób, aby zminimalizować koszty strat środowiskowych (1)

$$J(d(X^*)) \Rightarrow \min,$$

przy spełnieniu ograniczeń na koszt operacji

$$\sum_{i=1}^N c_{ik} \leq C_k \quad \text{dla } k \in \{1, \dots, K\}.$$

Obliczanie kosztów szkód środowiskowych J , jest oparte na wykorzystaniu modeli komputerowych typu REGFOR przedstawionych w pracach P. Holnicki *et al.* (1994), P. Holnicki, A. Kałużsko (1999), P. Holnicki *et al.* (2000).

3. Heurystyczny algorytm rozwiązania zadania

Do rozwiązania postawionego wyżej zadania zaproponowano algorytm heurystyczny, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 1. Rozwiązanie problemu przebiega w dwóch etapach:

1. wybór zadań (technologii) dla wszystkich źródeł,
2. ułożenie harmonogramu wprowadzania wybranych technologii.

Zakładamy, że na początku wszystkie zasoby są przeznaczone na inwestycje, a ich udział w ogólnych kosztach maleje w czasie; przeciwnie koszty eksploatacji -- od zera na początku, z upływem czasu rosną do maksimum. Zasoby, będące w naszej dyspozycji są pokazane na rys. 2.

Dostępne środki finansowe stanowiące ograniczenie (8) są teraz wstępnie dzielone w taki sposób, aby były spełnione nierówności

$$\sum_{i=1}^N (u_i^0 \sum_{j=1}^M f_{ij}^1 x_{ij}) \leq C_{inv} \quad (9a)$$

$$\sum_{i=1}^N (u_i^0 \sum_{j=1}^M f_{ij}^2 x_{ij}) \leq C_{inv} = C_k \quad (9b)$$

Zauważmy, że powyższe ograniczenia są różnego rodzaju: (9a) jest ograniczeniem na zasoby, podczas gdy (9b) jest ograniczeniem na natężenie zużycia (strumień) zasobów.

Etap 1

Tworzymy współczynniki r_{ij}^1 oraz r_{ij}^2 charakteryzujące efektywność j -tej technologii redukcji zastosowanej do i -tego źródła, w odniesieniu do jednostkowych kosztów f_{ij}^1 oraz f_{ij}^2

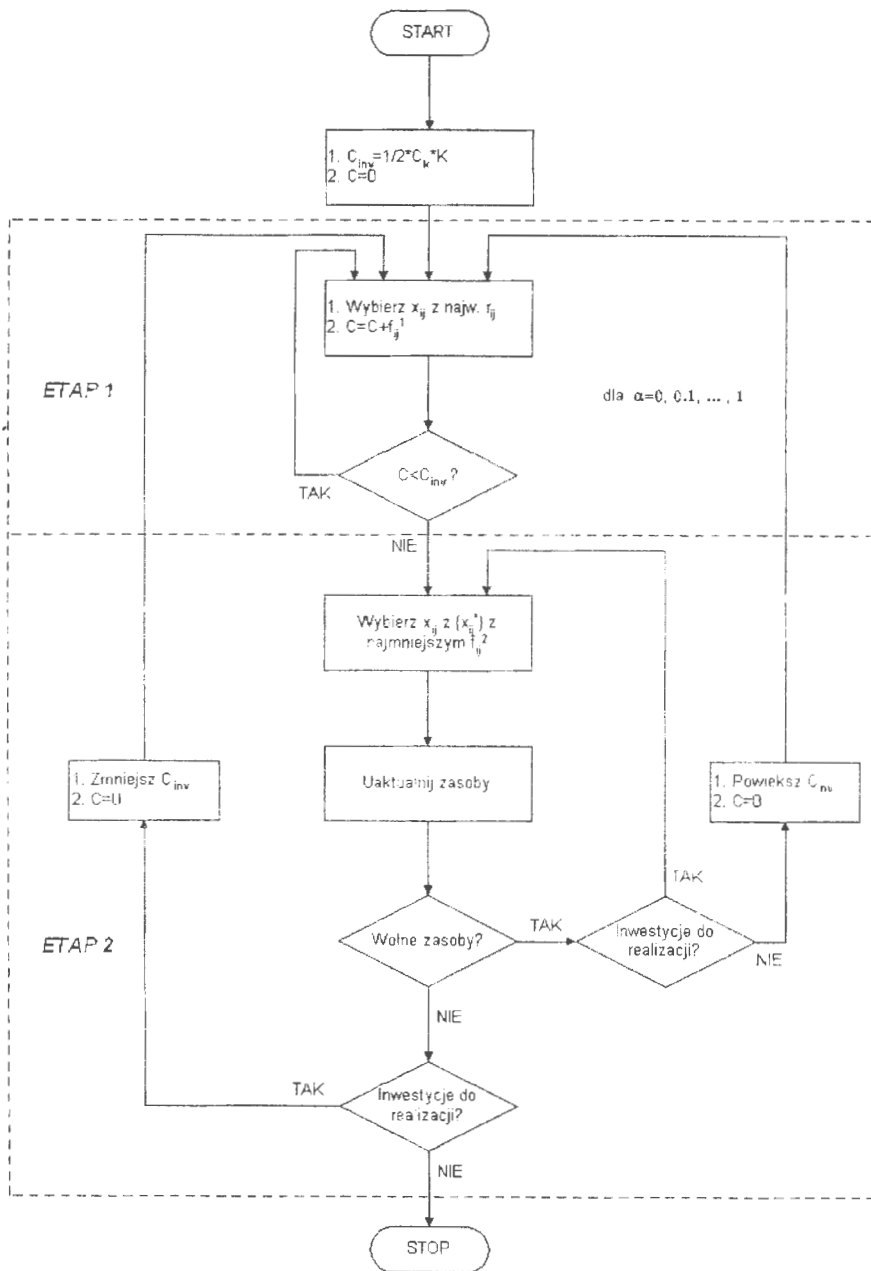
$$r_{ij}^1 = \alpha [u_i^0 (1 - e_j) / f_{ij}^1] + (1 - \alpha) \left[\int_{L_x} \int_{L_y} A_i(x, y) (1 - e_j) / f_{ij}^1 \right], \quad \alpha \in \langle 0, 1 \rangle$$

$$r_{ij}^2 = \alpha [u_i^0 (1 - e_j) / f_{ij}^2] + (1 - \alpha) \left[\int_{L_x} \int_{L_y} A_i(x, y) (1 - e_j) / f_{ij}^2 \right], \quad \alpha \in \langle 0, 1 \rangle$$

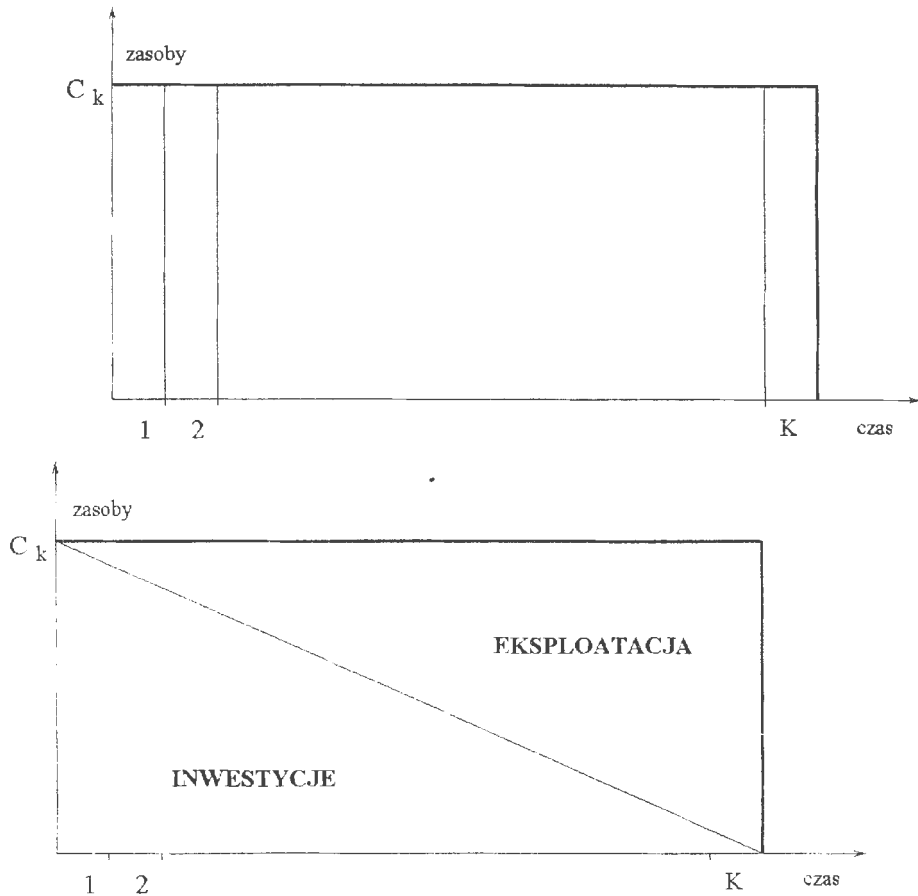
i obliczamy uśredniony współczynnik

$$r_{ij} = r_{ij}^1 + r_{ij}^2$$

Dla danej wartości współczynnika skalującego α rozwiązujemy



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu obliczeniowego



Rys. 2. Wstępny podział zasobów pomiędzy inwestycje i eksploatację

ZADANIE WYBORU przeglądając kolejne rozwiązania x_{ij} , poczynając od największej wartości r_{ij} . Postępujemy tak aż do wyczerpania wszystkich zasobów C_{inv} , po czym wyznaczamy rozwiązanie najlepsze w tym etapie, x_{ij}^* . Procedura jest powtarzana dla $\alpha = 0, 0.1, \dots, 1$. Mając teraz określone x_{ij}^* , przechodzimy do

Etapu 2

Naszym zadaniem jest ułożenie harmonogramu inwestycji wybranych w poprzednim etapie. Umieszczamy je wszystkie w kolejce według rosnących kosztów eksploatacji f_{ij}^2 . Inwestycję z kolejki rozpoczynamy w pierwszym kroku czasowym

k z wolnymi zasobami, i zużywamy ich tyle ile to możliwe na koszty inwestycyjne. Jeśli na inwestycję potrzeba więcej zasobów niż jest dostępne w kroku k , to kontynuujemy inwestycję w kroku następnym. Następnie obniżamy ilość dostępnych zasobów o f_{ij}^2 (koszty eksploatacji) w każdym kroku po zakończeniu inwestycji.

Jeśli kolejka inwestycji jest pusta, a pewna ilość zasobów jest nadal wolna, powiększamy C_{inv} i wracamy do etapu 1. Jeśli wszystkie zasoby są wykorzystane, natomiast w kolejce są nadal inwestycje -- obniżamy C_{inv} i wracamy do etapu 1. Cała procedura (etap 1 i 2) jest zakończona, gdy:

- nie ma żadnych inwestycji (wybranych w etapie 1) w kolejce,
- nie ma wolnych zasobów.

4. Porównanie metod alokacji środków

Opisana w poprzednim punkcie metoda heurystyczna nie jest jedynym podejściem, jakie można zastosować do rozwiązania postawionego zadania. Została ona porównana pod względem efektywności z innymi algorytmami.

Najprostsza metoda rozdziału zasobów pomiędzy źródła polega na umieszczeniu wszystkich zadań na liście (przez zadanie rozumiemy źródło emisji i technologię redukcji emisji przypisaną do tego źródła). Liczba zadań na liście jest iloczynem liczby źródeł i liczby technologii, natomiast ich kolejność zależy od stopnia redukcji emisji SO_2 , wyrażonej w liczbach bezwzględnych.

Alokację inwestycji rozpoczynamy od wyboru pierwszego zadania na liście. W dalszej kolejności sprawdzamy, czy wystarczy nam zasobów na realizację inwestycji związanych z wybranym zadaniem, a także na eksploatację wybranej technologii. W przypadku pozytywnej odpowiedzi rozpoczynamy realizację zadania, a następnie uaktualniamy zasoby pozostające do naszej dyspozycji oraz usuwamy z listy zadań wszystkie zadania dotyczące wybranego źródła. W przypadku odpowiedzi negatywnej usuwamy rozpatrywane zadanie z listy. Algorytm alokacji środków kończy działanie, gdy lista zadań jest pusta. W przeciwnym wypadku -- powtarzane są opisane wcześniej kroki.

Modyfikacją powyższej metody jest tworzenie listy zadań według kryterium będącego sumą ważoną stopnia redukcji emisji i kosztów (inwestycyjnych i/lub eksploatacji). Można to zapisać w następujący uproszczony sposób (pomijamy fakt, że redukcja emisji i jej koszty są wyrażone w innych jednostkach):

$$\text{kryterium} = \beta * \text{stopień redukcji emisji} + (1 - \beta) * \text{koszty redukcji.}$$

Algorytm rozpoczyna działanie od wartości β równej zeru, czyli w alokacji środków uwzględniane są jedynie koszty redukcji. Wybór zadań z listy jest zakończony, gdy lista jest pusta. Kolejność zadań na liście zależy w tym wypadku tylko od kosztów, przy czym zadanie jest tym wyżej na liście, im mniejsze są koszty

związane z jego realizacją. Preferowane są zatem zadania o niskich kosztach, ale związane z małą redukcją emisji. W takim przypadku się zdarzyć, że po przypisaniu wybranej technologii do każdego źródła (lista zadań jest pusta), zostaną nam nie wykorzystane zasoby. Oznacza to, że należy w kryterium ustalania kolejności zadań na liście uwzględnić również stopień redukcji emisji, czyli przyjęcie $\beta > 0$.

Zadaniem algorytmu jest sprawdzenie i porównanie rozwiązań dla różnych wartości $\beta \in \langle 0,1 \rangle$. Zbyt małe wartości β powodują niepełne wykorzystanie zasobów, zaś zbyt duże β -- preferowanie niekorzystnych, kosztownych rozwiązań powodujących dużą redukcję emisji. Algorytm wyszukuje więc najlepsze rozwiązanie, przez przegląd i porównywanie rozwiązań dla różnych wartości β z przedziału $\langle 0,1 \rangle$.

Dla porównania efektywności opisanych wcześniej metod zaimplementowano 5 algorytmów alokacji, które sprawdzono na zestawie 80 zadań testowych, do których dane były generowane w sposób losowy. Każde zadanie dotyczy 20 źródeł emisji i 8 technologii redukcji emisji. Są to następujące metody:

- 1) metoda przeglądu z pojedynczym kryterium ustalania kolejności na liście zadań (stopień redukcji emisji),
- 2) metoda przeglądu z mieszanym kryterium ustalania kolejności na liście zadań (stopień redukcji emisji i koszty inwestycyjne),
- 3) metoda przeglądu z mieszanym kryterium ustalania kolejności na liście zadań (stopień redukcji emisji i koszty eksploatacji),
- 4) metoda przeglądu z mieszanym kryterium ustalania kolejności na liście zadań (stopień redukcji emisji i koszty inwestycyjne oraz koszty eksploatacji),
- 5) metoda heurystyczna.

Porównanie efektywności metod jest pokazane na rys. 3. Na osi odciętych pokazano numer wygenerowanego zadania, a na osi rzędnych stopień redukcji kosztów środowiskowych względem stanu początkowego.

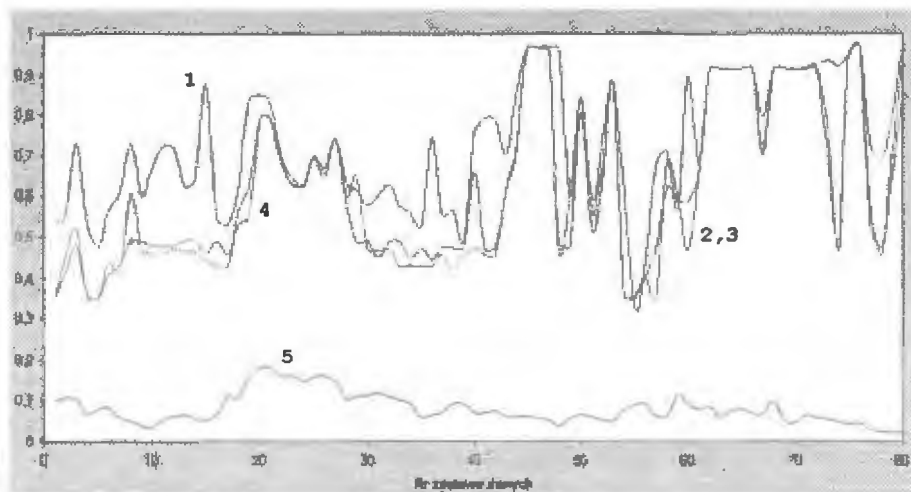
Na podstawie analizy rysunku można wysnuć następujące wnioski:

metody nr 2, 3, 4 średnio dają rozwiązania podobnej jakości,

- metoda nr 1 średnio daje najgorsze rozwiązania,
- rozwiązania uzyskane przez metody nr 1, 2, 3, 4 mają duży stopień przypadkowości, co widać przez porównanie z rozwiązaniami uzyskanymi za pomocą metody nr 5,
- metoda nr 5 średnio daje najlepsze rozwiązania. Są one zwykle kilka-krotnie lepsze od rozwiązań uzyskanych przez pozostałe metody.

Warte podkreślenia jest także to, że najgorsze rozwiązania daje metoda nr 1, która intuicyjnie wydaje się być dobra -- środki przeznaczamy przede wszystkim na te przedsięwzięcia, które powodują największą redukcję emisji.

Czas obliczeń na komputerze PC z procesorem Pentium 200 w przypadku zadań testowych (20 źródeł i 8 technologii) wynosi dla metod nr 1, 2, 3, 4 ok. kilkunastu sekund, natomiast dla metody nr 5 ok. 1--2 minut, a więc jest o rząd wielkości dłuższy. Metoda nr 5 znacznie dokładniej przeszukuje obszar rozwiązań, co daje lepsze rozwiązania, ale wydłuża czas obliczeń. Zadanie alokacji środków na redukcję emisji jest rozwiązywane rzadko, toteż czas obliczeń nie odgrywa decydującej roli. Duże znaczenie ma natomiast jakość uzyskanego rozwiązania. Wyniki analizy przedstawiono w pracy P. Holnicki, A. Kałużko (1999).



Rys. 3. Porównanie metod wyboru procesów i technologii redukcji emisji SO_2

5. Przykład zastosowania algorytmu alokacji środków do wyboru optymalnej strategii ograniczania emisji w skali regionu

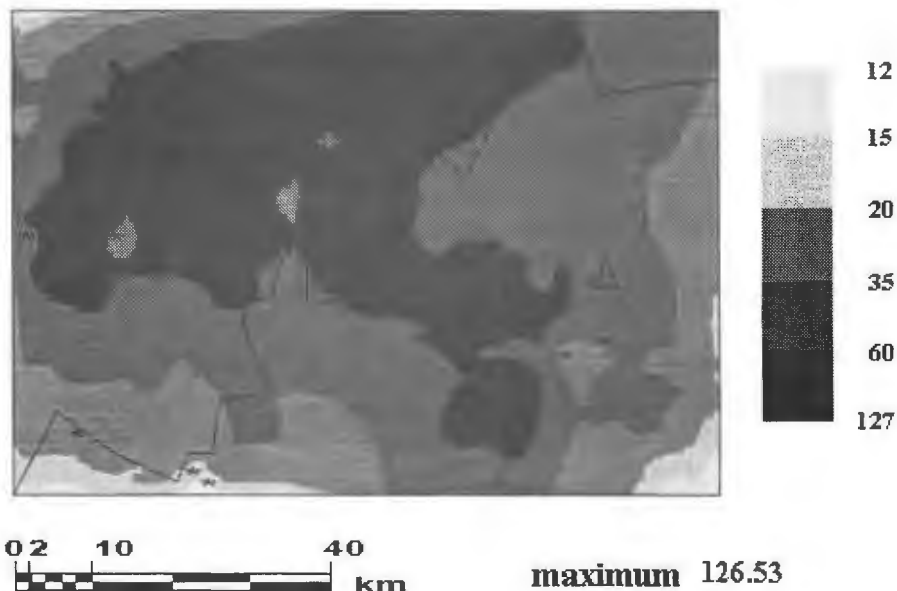
Omówiona poprzednio metoda heurystyczna (5) została zastosowana do określenia alokacji technologii odsiarczania spalin w największych zakładach energetyki zawodowej, zlokalizowanych w przemysłowym regionie katowicko-krakowskim. Region ten wybrano dla przetestowania działania metody, ze względu na dużą koncentrację źródeł emisji reprezentujących sektor energetyki. Algorytm może być jednak zastosowany w dowolnym regionie, w którym istotny jest problem wyboru strategii ograniczenia emisji.

Rozważany prostokątny obszar o wymiarach 110 km na 76 km zdyskretyzowano dla celów obliczeniowych siatką kwadratową o boku $h = 2\text{km}$. W obszarze wyróżniono 20 dominujących, sterowanych źródeł emisji oraz kilkanaście mniejszych źródeł przemysłowych i energetycznych, które w tym przypadku stanowiły tło w sumarycznym polu emisji.

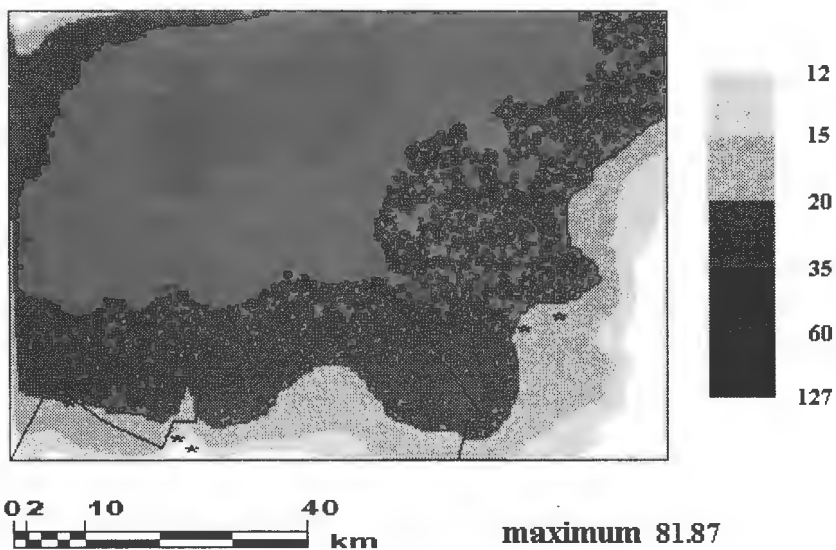
W analizie wzięto pod uwagę 8 technologii odsiarczania spalin (5 podstawowych oraz 3 złożone) o następujących efektywnościach:

- technologia "zerowa" ($e = 0$),
- stosowanie węgla niskosiarkowego ($e \cong 30$),
- metoda sucha ($e \cong 35$),
- metoda półsucha ($e \cong 75$),
- metoda MOWAP ($e \cong 85$),
- węgiel niskosiarkowy + metoda sucha ($e \cong 545$),
- węgiel niskosiarkowy + metoda pół sucha ($e \cong 825$),
- węgiel niskosiarkowy + metoda MOWAP ($e \cong 895$).

Obliczenia przeprowadzono dla kilku poziomów nakładów. Średnio-sezonowe rozkłady stężenia dwutlenku siarki dla poszczególnych źródeł (dla sezonu zimowego i letniego) były generowane za pomocą regionalnego modelu prognostycznego REGFOR3 (P. Holnicki *et al.*, 1994; 2000). Dla wybranego roku generowano mapy rozkładu zanieczyszczeń, przyjmując jako dane wejściowe ciąg sytuacji synoptycznych wprowadzanych z krokiem czasowym 12h. Dla każdego z analizowanych źródeł zostało wyznaczone średniosezonowe, jednostkowe pole rozkładu stężenia SO_2 , wykorzystane następnie w algorytmie poszukiwania strategii ograniczenia emisji.

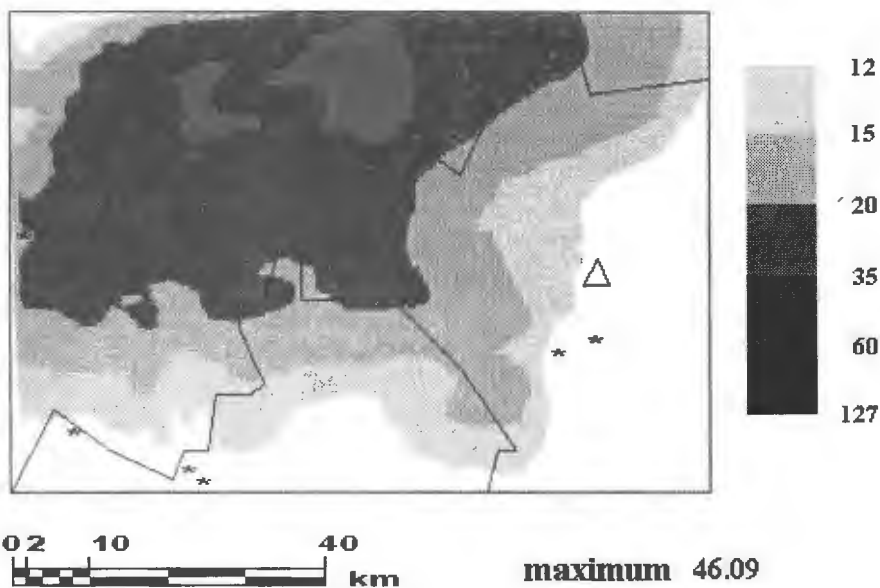


Rys. 4. Początkowy rozkład koncentracji SO_2 w regionie.



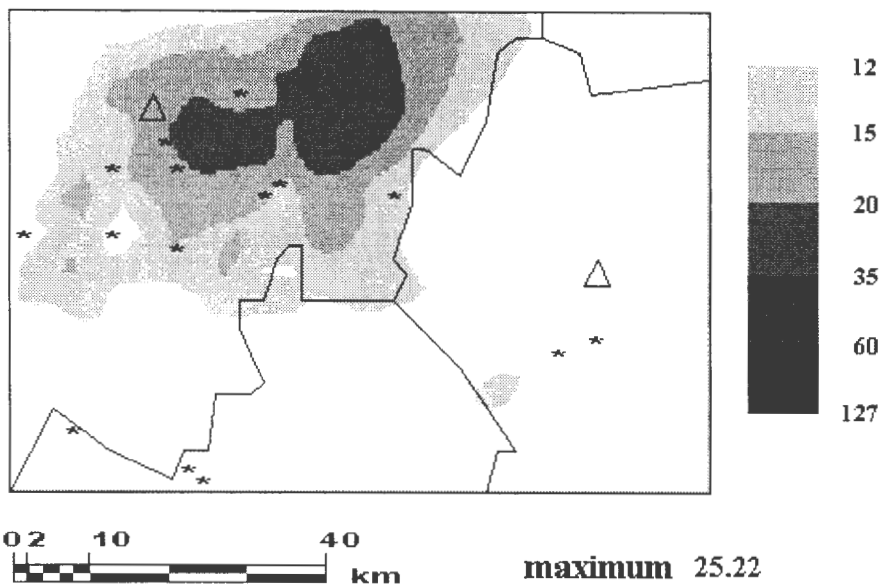
Źródło nr	Technologia odsiarczania					Emisja [t/doba]	
	1	2	3	4	5	pocz.	końc.
1	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	303.20	137.96
2	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	228.30	225.30
3	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	104.00	67.60
4	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	91.80	41.77
5	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	90.10	41.00
6	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	78.00	78.00
7	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	65.00	65.00
8	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.00	52.00
9	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.00	52.00
10	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.10	45.10
11	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.70	34.70
12	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	33.80	15.38
13	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	29.90	19.43
14	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	25.10	11.42
15	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	26.00	18.20
16	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	18.70	13.09
17	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.90	16.90
18	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	15.10	10.57
19	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.30	12.30
20	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.60	11.60

Rys. 5. Wyznaczona strategia dla poziomu nakładów 150 mln zł/rok
(współczynnik redukcji wskaźnika jakości = 0.4)



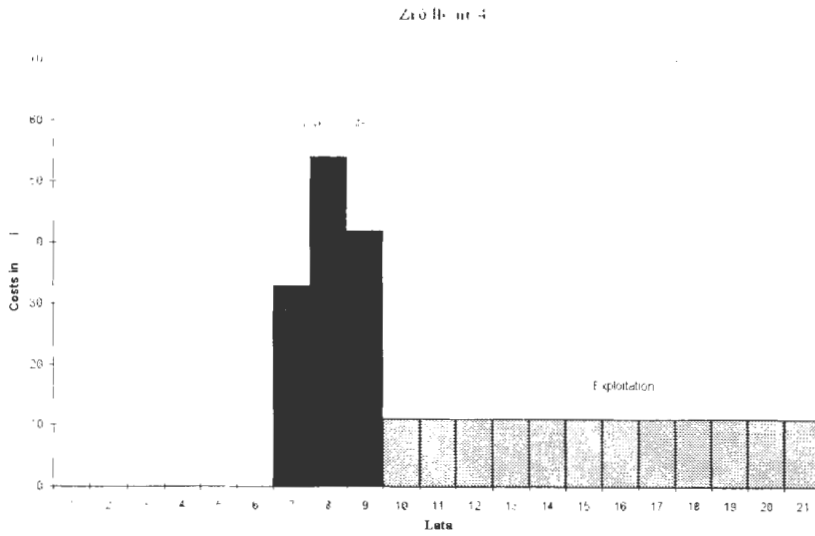
Źródło nr	Technologia odsiarczania					Emisja [t/doba]	
	1	2	3	4	5	pocz.	końc.
1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	303.20	45.48
2	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	228.30	146.45
3	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	104.00	47.32
4	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	91.80	41.77
5	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	90.10	15.77
6	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	78.00	54.60
7	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	65.00	42.25
8	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.00	52.00
9	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	52.00	33.80
10	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	45.10	29.31
11	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	34.70	24.29
12	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	33.80	3.55
13	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	29.90	4.48
14	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	25.10	6.28
15	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	26.00	11.83
16	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	18.70	8.51
17	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.90	16.90
18	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	15.10	6.87
19	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.30	12.30
20	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	11.60	8.12

Rys. 6. Wyznaczona strategia dla poziomu nakładów 450 mln zł/rok
(współczynnik redukcji wskaźnika jakości = 0.15)

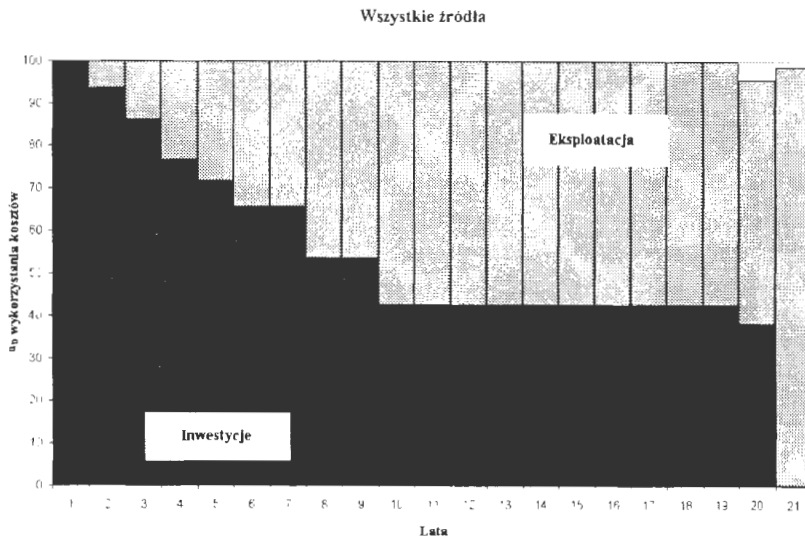


Źródło nr	Technologia odsiarczania					Emisja [t/doba]	
	1	2	3	4	5	pocz.	końc.
1	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	303.20	31.84
2	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	228.30	146.45
3	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	104.00	10.92
4	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	91.80	9.64
5	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	90.10	9.46
6	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	78.00	35.49
7	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	65.00	29.57
8	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.00	52.00
9	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	52.00	23.66
10	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	45.10	20.52
11	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	34.70	22.56
12	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	33.80	3.55
13	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	29.90	3.14
14	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	25.10	2.64
15	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	26.00	2.73
16	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	18.70	1.96
17	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	16.90	11.83
18	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	15.10	2.64
19	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	12.30	8.00
20	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	11.60	5.28

Rys. 7. Wyznaczona strategia dla poziomu nakładów 750 mln zł/rok
(współczynnik redukcji wskaźnika jakości = 0.07)



Rys. 8. Rozkład czasowy wykorzystania zasobów dla źródła nr 4



Rys. 9. Rozkład czasowy wykorzystania zasobów dla wszystkich źródeł

Na rys. 4 przedstawiono początkowy, sumaryczny rozkład stężenia dwutlenku siarki, natomiast wyniki alokacji środków dla trzech kolejnych poziomów nakładów finansowych: 150, 450, 750 mln zł/rok, przedstawiają rys. 5--7. Załączone tabele przedstawiają uzyskany wybór technologii odsiarczania dla każdej z analizowanych elektrowni. Mapa przedstawia rozkład stężenia zanieczyszczeń, odpowiadający wybranej (najlepszej dla danego poziomu nakładów) strategii odsiarczania. Odpowiada ona poziomowi emisji, jaki osiągnięty będzie po zakończeniu procesu inwestycyjnego we wszystkich elektrowniach. Końcowe mapy koncentracji można porównać ze stanem wyjściowym przedstawionym na rys.4.

Rysunek 8 przedstawia rozkład czasowy kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych dla wybranego źródła, zaś rysunek 9 rozkład czasowy kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych dla wszystkich źródeł.

Literatura

- Alcamo J., Hordijk L., Shaw R. (1990) *The Rains Model of Acidification: Cost-effective Sulfur Emission Reduction Under Uncertainty*. IIASA, WP-94-119, Laxenburg.
- Dernwent R.G. (1988) A better way to control air pollution. *Nature* 331, February, str. 575 - 578.
- Holnicki P., Żochowski A. (1990) *Wybrane metody matematyczne analizy jakości powietrza atmosferycznego*. PWN. Warszawa.
- Holnicki P., Kaluszko A., Żochowski A. (1994) A microcomputer implementation of air quality forecasting system for urban scale. *Microcomputer Applications*, 13, No. 2, str. 76 -- 84.
- Holnicki P., Kaluszko A. (1999) *Metody wyznaczania strategii redukcji SO₂ w skali regionu*. Raport Instytutu Badań Systemowych PAN, No AB-8/99/2, Warszawa.
- Holnicki P., Nahorski Z., Żochowski A. (2000) *Modelowanie procesów środowiska naturalnego*. Wydawnictwa Wyższej Szkoły Informatyki Stosowanej i Zarządzania. Warszawa.
- Juda K. (1987) *Trójwarstwowy model matematyczny rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń atmosferycznych na obszarach zurbanizowanych*. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa.
- Zannetti P. (1990) *The Air Pollution Modeling*. Computational Mechanics Publ., Southampton.

ISSN 0208-8028
ISBN 83-85847-59-6

**W celu uzyskania bliższych informacji i zakupu dodatkowych egzemplarzy
prosimy o kontakt z Instytutem Badań Systemowych PAN
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa
tel. 837-35-78 w. 241 e-mail: bibliote@ibspan.waw.pl**