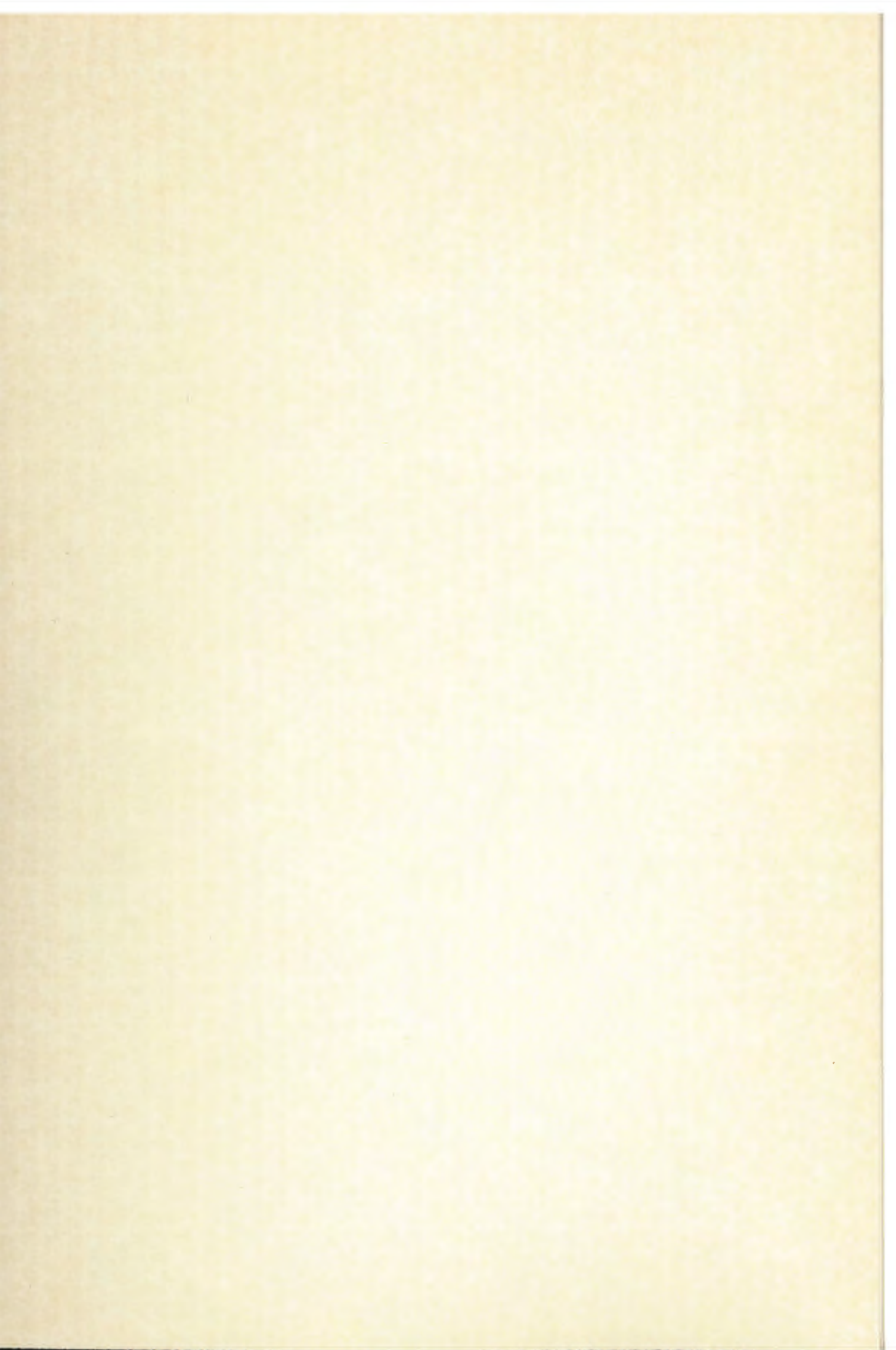




POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

**WSPOMAGANIE INFORMATYCZNE
ROZWOJU
SPOŁECZNO-GOSPODARCZEGO
I OCHRONY ŚRODOWISKA**

Redakcja:
Jan Studziński
Ludostław Drelichowski
Olgierd Hryniewicz





**WSPOMAGANIE INFORMATYCZNE
ROZWOJU
SPOŁECZNO-GOSPODARCZEGO
I OCHRONY ŚRODOWISKA**

Polska Akademia Nauk Instytut Badań Systemowych

Seria: BADANIA SYSTEMOWE

tom 36

Redaktor naukowy:

Prof. dr hab. Jakub Gutenbaum

Warszawa 2004

**WSPOMAGANIE INFORMATYCZNE
ROZWOJU
SPOŁECZNO-GOSPODARCZEGO
I OCHRONY ŚRODOWISKA**

Redakcja:

Jan Studziński
Ludosław Drelichowski
Olgierd Hryniewicz

Książka wydana dzięki dotacji KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH

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

Recenzenci artykułów:

Dr Lucyna Bogdan
Prof. dr hab. inż. Olgierd Hryniewicz
Dr Grażyna Petriczek
Prof. dr hab. inż. Andrzej Straszak
Dr inż. Jan Studziński



Senia 45187

Komputerowa edycja tekstu: Anna Gostyńska

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2004

Wydawca: Instytut Badań Systemowych PAN
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa

Sekcja Informacji Naukowej i Wydawnictw IBS PAN
tel. 836-68-22

Druk: Zakład Poligraficzny Urzędu Statystycznego w Bydgoszczy
Nakład 110 egz.

ISBN 83-85847-92-8
ISSN 0208-8028

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA MODELI PROGNOSTYCZNYCH DO STEROWANIA EMISJĄ W CZASIE RZECZYWISTYM

Piotr Holnicki

*Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk
<holnicki@ibspan.waw.pl>*

The paper presents a formulation of the problem of real-time emission control in a predefined set of air pollution sources. The approach utilizes the optimal control technique for distributed parameter systems. The controlled object considered is a set of pointwise emission sources with a predefined location and emission characteristics. The problem is formulated as on-line minimization of an environmental cost function, by the respective modification of emission level in the controlled sources, according to the changing meteorological conditions. The environmental cost function depends on the current level of SO_x concentration and the sensitivity of the area on this type of air pollution. Dispersion of the atmospheric pollution is governed by a multi-layer dynamic model of SO_x transport, which is the main forecasting tool. The basic objective function includes the overall environmental damage and the cost of the controlling action. The adjoint equation, related to the main transport equation of the forecasting model, is applied to calculate the gradient of the objective function in the main optimization procedure. The test computations have been performed for a set of the major power plants in a selected industrial region of Poland.

Keywords: Air pollution, mathematical modeling, emission control.

1. Opis procesu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

Bezpośrednie wykorzystanie modeli propagacji zanieczyszczeń atmosferycznych dotyczy przede wszystkim prognozowania stanu zanieczyszczenia powietrza oraz wpływu tego zanieczyszczenia na jakość środowiska naturalnego. Prace wykorzystujące w tej dziedzinie metody optymalizacyjne najczęściej koncentrują się na projektowaniu sieci monitoringowej i bardzo często mają charakter czysto akademicki. Równocześnie wiele decyzji dotyczących jakości środowiska, które mogłyby być wspomagane przez modele komputerowe – jest podejmowanych bezpośrednio przez odpowiednich decydentów. Jest natomiast wiele modeli i metod optymalizacyjnych, które mogą być praktycznie wykorzystane przy określaniu strategii ochrony i sterowania jakością środowiska.

Jednym z przykładów może być wykorzystanie długoterminowych modeli prognostycznych, do oceny ewentualnych skutków środowiskowych różnych strategii rozwoju sektora energetyki w Polsce omówione w (Ciechanowicz i in., 1996). Z kolei, zagadnienie ograniczenia emisji w skali regionalnej, dotyczące optymalnego wyboru strategii odsiarczania spalin w grupie zakładów energetyki zawodowej przedstawiono w (Holnicki, Kałuszek, 2003). Z punktu widzenia sformułowania matematycznego, oba zadania rozważane były jako zagadnienia optymalizacji statycznej.

Dynamiczne modele prognozujące rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń atmosferycznych mogą również stanowić podstawę do budowy systemów sterowania emisją w czasie rzeczywistym. W takim przypadku, formułowane jest zadanie sterowania optymalnego, którego celem jest minimalizacja pewnego wskaźnika strat środowiskowych, przez odpowiednią modyfikację poziomu emisji źródeł sterowanych. Sterowanie emisją jest wówczas reakcją na zmieniające się warunki meteorologiczne (np. kierunek wiatru). Algorytmy rozwiązujące tego typu zadania korzystają zwykle z pewnych procedur, które pozwalają określić ilościowo udział poszczególnych źródeł emisji w zagrożeniu środowiska. Tego typu zagadnienia rozważano m.in. w (Marchuk, 1995).

Zakładamy dalej, że proces rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń może być opisany odpowiednim układem równań transportu. Implementacja opisana w pracy jest zorientowana na zanieczyszczenia tlenkami siarki, ale proponowane rozwiązania mogą być rozszerzone na modele prognostyczne dotyczące innych rodzajów zanieczyszczeń. Procesy transportu zanieczyszczeń są opisywane przez dynamiczny, trójwarstwowy model typu lagranżowskiego (Holnicki, 1995; Holnicki, Nahorski, Żochowski, 2000). W modelu brane są pod uwagę dwa podstawowe rodzaje zanieczyszczeń siarkowych: zanieczyszczenia pierwotne – SO_2 oraz wtórne – SO_4^- , powstające głównie w wyniku przemian chemicznych. Transport i przemiany zanieczyszczeń są obserwowane i obliczane wzdłuż trajektorii pola wiatru. W równaniach transportu uwzględniono przemiany chemiczne $SO_2 \rightarrow SO_4^-$, procesy suchej depozycji zanieczyszczeń na powierzchni ziemi oraz ich wymywanie przez opady.

Zasadnicze wyjście stanowią mapy rozkładów koncentracji SO_2 , uśrednione dla każdej warstwy modelu (model trójwarstwowy). Ponieważ dla celów obliczeniowych stosowana jest dyskretyzacja przestrzenna oraz czasowa obszaru, wyniki prezentowane są w postaci map dyskretnych, na koniec kolejnych kroków czasowych modelu. Podstawowe równania transportu, rozważane w jednej warstwie czasowej, mają następującą postać ogólną

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{v} \nabla c - K_h \Delta c + \gamma c = Q + \sum_{i=1}^N q_i \quad (1)$$

wraz z warunkami brzegowymi:

$$c = c_b \text{ on } S^- = \{ \partial \Omega \times (0, T) \mid \vec{v} \cdot \vec{n} < 0 \}$$

$$K_h \frac{\partial c}{\partial \vec{n}} = 0 \text{ on } S^+ = \{ \partial \Omega \times (0, T) \mid \vec{v} \cdot \vec{n} < 0 \} \quad (1a)$$

oraz warunkiem początkowym

$$c(0) = c_0 \text{ w } \Omega. \quad (1b)$$

Stosowane są tu następujące oznaczenia:

Ω – rozważany obszar, z brzegiem $\partial \Omega = S^+ \cup S^-$,

$(0, T)$ – przedział czasowy prognozy,

c – koncentracja zanieczyszczeń,

\vec{u} – wektor pola wiatru,

\vec{n} – wektor normalny brzegu obszaru $\partial \Omega$,

K_h – współczynnik dyfuzji horyzontalnej,

γ – współczynnik redukcji, związany z depozycją i przemianami zanieczyszczeń,

Q – całkowite pole emisji.

Wymiana turbulencyjna zanieczyszczeń między warstwami jest parametryzowana przez wprowadzenie odpowiedniego współczynnika dyfuzji turbulencyjnej, zależnego m.in. od warunków meteorologicznych (Holnicki, Kałużko, Żochowski, 1993; Holnicki, Nahorski, Żochowski, 2000).

Rozważane dalej pole emisji tworzą tzw. *źródła sterowane*, za pośrednictwem których realizowane będzie sterowanie, oraz grupa *źródeł nie sterowanych*, tworzących tło zanieczyszczeń. Całkowite pole emisji będzie zatem opisywane w następujący sposób

$$Q(x, y, t) = q(x, y, t) + \sum_{i=1}^N \chi_i(x, y) \cdot q_i(t) \quad (2)$$

gdzie:

$q(x, y, t)$ – pole emisji źródeł nie sterowanych (tło zanieczyszczeń),

$q_i(t)$ – poziom emisji i -tego źródła sterowanego,

$\chi_i(x, y)$ – funkcja charakterystyczna i -tego źródła sterowanego.

Algorytm numeryczny wykorzystany do rozwiązywania powyższych równań, oparto na dyskretnej w czasie aproksymacji liniowym elementem skończonym, połączonej z metodą charakterystyk (Holnicki, Kałużsko, Żochowski, 1993; Holnicki, Żochowski, Warchałowski, 2001; Holnicki, Nahorski, Żochowski, 2000). Zastosowano jednorodną dyskretyzację przestrzenną obszaru, ze stałym krokiem $h = \Delta x = \Delta y$. Rozmieszczenie punktów czasowych wzdłuż charakterystyki pola wiatru wynika z odpowiedniego doboru długości kroku τ , wyznaczanego przez sam algorytm. Dzięki temu, że równania bilansu masy zanieczyszczeń analizowane są wzdłuż linii pola wiatru, algorytm charakteryzuje się wysoką efektywnością obliczeniową oraz dokładnością.

2. Zadanie sterowania optymalnego

Matematyczny opis równania transportu przedstawiony w poprzednim punkcie, może być wykorzystany do sformułowania zadania sterowania emisją. Ogólna zasada takiego sterowania polega na tym, że będziemy dążyć do minimalizacji pewnego wskaźnika strat środowiskowych, stosownie do zmieniających się warunków meteorologicznych. Sterowanie ma być realizowane przez redystrybucję poziomu emisji poszczególnych źródeł. Ponadto, w zadaniu sterowania mogą być uwzględnione dodatkowe ograniczenia, np. typu technicznego lub ekonomicznego.

Aby sformułować zadanie sterowania wprowadzamy kilka niezbędnych oznaczeń. Zakładamy, że w obszarze Ω mamy N sterowanych źródeł emisji o znanej charakterystyce przestrzennej $\chi_i(x, y)$ oraz intensywności emisji, $q_i(t)$. W obszarze zlokalizowano ponadto pewną liczbę źródeł nie sterowanych, generujących tło zanieczyszczeń, których sumaryczne pole emisji oznaczono przez q .

Równanie stanu. Zmienną stanu jest rozkład koncentracji zanieczyszczeń $c(x, y, t)$, spełniający następujące równanie transportu

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{v} \nabla c - K_h \Delta c + \gamma c = q + \sum_{i=1}^N q_i \quad \text{w } \Omega \times (0, T) \quad (3)$$

z warunkami brzegowymi (1b) oraz warunkiem początkowym (1c). Funkcja $q(x, y, t)$ reprezentuje nie sterowane pole emisji (tło zanieczyszczeń). Przestrzenno-czasowy rozkład pola emisji poszczególnych źródeł sterowanych jest opisywany w następujący sposób

$$q_i(x, y, t) = \chi_i(x, y) \cdot F_i(u_i(t)) \quad \text{dla } i = 1, \dots, N$$

gdzie $\chi_i(x, y)$ określa przestrzenną lokalizację źródła, natomiast $F_i(u_i(t))$ stanowi charakterystykę czasową intensywności emisji. Funkcja wektorowa $\bar{u} = [u_1, \dots, u_N]$ oznacza tutaj sterowanie, a każda jej składowa reprezentuje poziom produkcji danego zakładu przemysłowego (np. poziom mocy generowanej przez elektrownię). Funkcje F_i , ($i=1, \dots, N$) wiążą poziom produkcji z intensywnością emisji źródeł, która występuje jako wymuszenie, po prawej stronie równania stanu.

Funkcjonał jakości, który ma być minimalizowany, składa się z dwóch części: kosztów środowiskowych (będących miarą stopnia degradacji jakości powietrza) oraz kosztu sterowania. Zdefiniowany jest następująco

$$J(\bar{u}) = \frac{\alpha_1}{2} \int_0^T \int_{\Omega} w[\max(0, c(\bar{u}) - c_{ad})] d\Omega dt + \frac{\alpha_2}{2} \int_0^T \sum_{i=1}^N \beta_i (u_i(t) - u_i^*) \quad (4)$$

Współczynniki α_1 , α_2 oraz β_i , ($i=1, \dots, N$) reprezentują zadane stałe, przy czym $\alpha_1 \geq 0$, $\alpha_2 \geq 0$, $\beta_i > 0$. Funkcja wagowa terenu spełnia nierówność $0 \leq w(x, y) \leq 1$, natomiast c_{ad} określa dopuszczalny poziom koncentracji zanieczyszczeń. Funkcje u_i^* , ($i=1, \dots, N$) reprezentują nominalny poziom produkcji (np. energii generowanej przez elektrownię) źródeł sterowanych.

Ograniczenia. W zadaniu rozważane są dwa rodzaje ograniczeń typu amplitudowego, nakładanych na sterowanie. Reprezentują one pewne limity typu technologicznego oraz ekonomicznego i są formułowane przez następujący układ nierówności:

$$\underline{u}_i \leq u_i(t) \leq \bar{u}_i \quad \text{dla } i=1, \dots, N \quad (5a)$$

$$\sum_{i \in N_j} \delta_{ij} u_i(t) \geq d_j \quad \text{dla } i=1, \dots, N, \quad N_j \subset \{1, \dots, N\} \quad (5b)$$

Nierówności (5a) mają charakter ograniczeń technologicznych, określających przedział, w którym winien mieścić się poziom mocy generowanej przez daną elektrownię (w ogólnym przypadku – poziom produkcji danego zakładu). Z kolei ograniczenie (5b) ma charakter popytowy i ma gwarantować, że sumaryczna produkcja rozważanych zakładów pokrywa zapotrzebowanie (np. na energię). W ogólnym przypadku, to ostatnie ograniczenie może być rozbite na kilka nierówności, dotyczących pewnych podzbiorów, powiązanych ze sobą źródeł sterowanych. Ograniczenie nakładane jest wówczas na i -ty podzbiór elektrowni, ze współczynnikami δ_{ij} .

Przez $U_{ad} \subset H^1(0, T; R^N)$ będziemy oznaczać zbiór sterowań dopuszczalnych, zdefiniowanych przez układ nierówności (5), czyli

$$U_{ad} = \{\bar{u} \in H^1(0, T; R^N) : \bar{u} \text{ spełnia ograniczenia (5)}\} \quad (6)$$

Równanie stanu (3) ma przy powyższych założeniach rozwiązanie $c = c(\bar{u})$, określone jednoznacznie (Lions, Magenes, 1968; Marchuk, 1995) dla danego sterowania $\bar{u} \in H^1(0, T; R^N)$ oraz ustalonych parametrów równania, K_h oraz γ , gdzie $K_h > 0$.

Zadanie sterowania optymalnego (P). Znaleźć element $\bar{u}^o(t)$ minimalizujący funkcjonal (4) w zbiorze sterowań dopuszczalnych

$$J(\bar{u}^o) = \inf_{\bar{u} \in U_{ad}} J(\bar{u})$$

gdzie $c(\bar{u})$ spełnia równanie stanu (3).

Zakładamy dalej, że istnieje stała $\sigma > 0$, dla której spełniona jest następująca nierówność

$$\langle DJ(\bar{u}) - DJ(\bar{v}), \bar{u} - \bar{v} \rangle > \sigma \geq \|\bar{u} - \bar{v}\|_{H^1(0, T; R^N)}^2 \quad \forall \bar{u}, \bar{v} \in U_{ad} \quad (7)$$

gdzie $DJ(\bar{u})$ oznacza gradient funkcjonału (4). Ostatnia nierówność jest spełniona m.in. dla $F_i(u_i) = u_i$ oraz $\alpha_i > 0, \beta_i > 0, \delta > 0$. Spełnienie warunku (7) gwarantuje jednoznaczność (patrz [7]) rozwiązania zadania sterowania optymalnego (P).

Warunki optymalności. Wiadomo (Lions, Magenes, 1968; Marchuk, 1995), że rozwiązanie zadania (P) może być scharakteryzowane przez podany niżej układ trzech warunków. Znaleźć (\bar{u}^o, c^o, p^o) , gdzie $\bar{u}^o = [u_1^o, \dots, u_N^o] \in U_{ad}$, takie że:

a) równanie stanu

$$\frac{\partial c^o}{\partial t} + \bar{v} \nabla c^o - K_h \Delta c^o + \gamma c^o = Q + \sum_{i=1}^N \chi_i F_i(u_i^o) \quad \text{w } \Omega \times (0, T) \quad (8)$$

$$c^o = c_b^o \quad \text{na } S^-, \quad K_h \frac{\partial c^o}{\partial \bar{n}} = 0 \quad \text{na } S^+ \quad (8a)$$

$$c^o(0) = c_0^o \quad \text{w } \Omega \quad (8b)$$

b) równanie sprzężone

$$-\frac{\partial p^o}{\partial t} - \vec{v} \nabla p^o - K_h \Delta p^o + \gamma p^o = \alpha_1 w \cdot \max(0, c^o - c_{ad}) \quad \text{w } \Omega \times (0, T) \quad (9)$$

$$p^o = 0 \quad \text{na } S^-, \quad K_h \frac{\partial p^o}{\partial \vec{n}} + \vec{v} \cdot \vec{n} p = 0 \quad \text{na } S^+ \quad (9a)$$

$$p^o(T) = c_0^o \quad \text{w } \Omega. \quad (9b)$$

c) minimum funkcjonału celu

$$\sum_{i=1}^N \left\{ \alpha_1 \int_0^T \int_{\Omega} \chi_i F_i'(u_i^o) p^o(v_i - u_i^o) d\Omega dt + \alpha_2 \int_0^T \beta_i (u_i^o - u_i^*) (v_i - u_i^o) dt \right\} \geq 0 \quad (10)$$

$$\forall \vec{v} = [v_1, \dots, v_N] \in U_{ad}$$

Do numerycznego rozwiązania skończenie-wymiarowej aproksymacji zadania (P) można zastosować wybraną metodę gradientową. Z nierówności (10) wynika pośrednio, że gradient funkcjonału celu ma następującą postać

$$D_i J(\vec{u}) = \alpha_1 \int_0^T \int_{\Omega} \chi_i F_i'(u_i) p(v_i - u_i) d\Omega dt + \alpha_2 \int_0^T \beta_i (u_i - u_i^*) (v_i - u_i) dt \quad (i = 1, \dots, N). \quad (11)$$

W celu wyznaczenia składowych gradientu funkcji celu zgodnie z (11), w każdej iteracji procedury optymalizacyjnej należy wykonać następujące kroki:

- rozwiązać równanie stanu (8),
- rozwiązać równanie sprzężone (9) dla odwróconego czasu oraz kierunku wiatru,
- wykorzystując zmienną sprzężoną $p(x, y, t)$, obliczyć na podstawie (11) składowe gradientu funkcjonału (4).

W następnym rozdziale przedstawiono wyniki obliczeń testowych przeprowadzonych na danych rzeczywistych, dotyczących grupy elektrowni w wybranym regionie przemysłowym.

3. Obliczenia testowe na danych rzeczywistych

Zadanie sterowania, sformułowane w sposób ogólny w poprzednim rozdziale, zostało zaimplementowane dla grupy wybranych zakładów energetyki zawodowej, zlokalizowanych na obszarze Górnego Śląska oraz Krakowa. W realizowanym praktycznie zadaniu wprowadzono kilka uproszczeń w stosunku do sformułowania ogólnego omówionego poprzednio.

Zakładamy, że zbiór sterowań dopuszczalnych U_{ad} jest dany przez

$$U_{ad} = \{ \bar{u} \in H^1(0, T; \mathbb{R}^N) : \bar{u} \text{ spełnia (5) dla p.w. } t \in L^2(0, T) \} \quad (12)$$

gdzie warunek (5b) ma postać globalnego ograniczenia popytowego, nałożonego na wszystkie analizowane elektrownie, czyli

$$\sum_{i=1}^N \delta_i u_i(t) \geq d \quad (13)$$

Zakładamy ponadto dla uproszczenia, że relacja wiążąca poziom produkcji z emisją, F_i w (3) – jest identycznością, tzn.

$$F_i(u_i) = u_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (14)$$

Powyższa zależność oznacza, że poziom emisji będzie dalej traktowany jako sterowanie. Funkcjonał jakości $J(\bar{u})$ jest definiowany przez (4) dla $\bar{u} \in L^2(0, T; \mathbb{R}^N)$ oraz współczynników spełniających następujące warunki $\alpha_1 \geq 0, \alpha_2 > 0, \beta_i = \beta = 1$ dla $i = 1, \dots, N$.

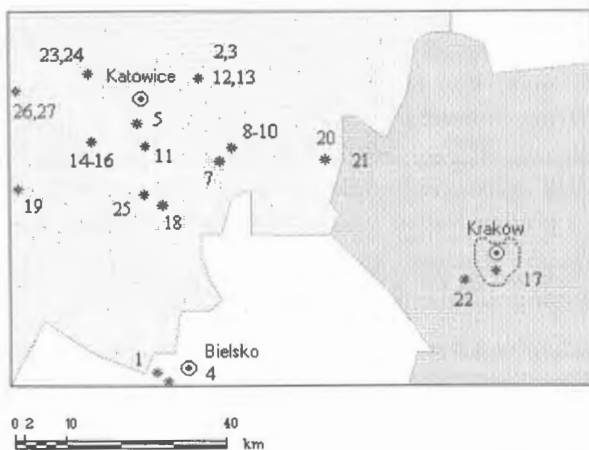
Obliczenia testowe były przeprowadzone dla 27 dominujących elektrowni, zlokalizowanych w śląsko-krakowskim okręgu przemysłowym (patrz rys. 1). Stanowi on prostokąt o wymiarach $110 \times 74 \text{ km}^2$, który dla celów obliczeniowych zdyskretyzowano siatką kwadratową o kroku $h = 2 \text{ km}$. Wynikający stąd wymiar siatki dyskretyzacji przestrzennej obszaru, to 55×37 . Na tej siatce oparto schemat aproksymacji skończenie wymiarowej równania stanu oraz równania sprzężonego. Funkcja wagowa terenu $w(x, y)$, występująca w funkcjonale (4), została zdefiniowana w taki sposób, aby otoczenie Krakowa było uwzględniane w sterowaniu jako obszar o szczególnie wysokiej wrażliwości. Obszar ten zaznaczono na rys. 1 linią przerywaną, natomiast sama funkcja wagowa ma postać

$$w(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{dla } (x, y) \text{ w obszarze Krakowa} \\ 0 & \text{dla } (x, y) \text{ poza tym obszarem} \end{cases} \quad (15)$$

Do realizacji algorytmu obliczeniowego, w części dotyczącej rozwiązywania równania stanu oraz równania sprzężonego, wykorzystano regionalny, trójwarstwowy model dynamiczny URFOR3 (Holnicki, Kałuszek, Żochowski, 1993; Holnicki, Nahorski, Żochowski, 2000). Aproksymacja równań transportu jest oparta na połączeniu przestrzennej dyskretyzacji obszaru siatką regularną z metodą elementu skończonego. Podejście takie umożliwia uzyskanie dużej efektywności obliczeniowej przy dobrej dokładności rozwiązań (Holnicki, 1995; Holnicki, Nahorski, Żochowski, 2000).

Realizację algorytmu optymalizacyjnego oparto na gradientowej metodzie linearyzacji Pszenicznego (Pschenitchny, 1983). Zgodnie z opisem zadania (P), omówionego w poprzednim rozdziale, w każdej iteracji tego algorytmu wykonywane są następujące obliczenia:

- rozwiązanie równania stanu w przedziale $(0, T)$,
- obliczenie wartości funkcjonału $J(\vec{u})$,
- rozwiązanie równania sprzężonego dla odwróconego czasu,
- obliczenie składowych gradientu funkcjonału $DJ(\vec{u})$,
- wykonanie kolejnego kroku algorytmu optymalizacji.



Rysunek 1. Obszar obliczeniowy i lokalizacja źródeł emisji

Numeryczną realizację przedstawionego wyżej algorytmu opracowano w kodzie FORTRAN 90. Obejmuje on generator pola wiatru, model prognostyczny rozwiązujący równanie stanu, rozwiązanie równania sprzężonego oraz gradientowy algorytm optymalizacyjny, oparty na metodzie Pszenicznego (Pschenitchny, 1983). Do obliczeń wykorzystano system pracujący na platformie UNIX.

Obliczenia testowe przeprowadzono dla rzeczywistych danych, dotyczących określonych źródeł energetycznych dla sezonu zimowego. Nominalne wartości parametrów emisji wybranych źródeł przedstawiono w pierwszej części tab. 2. Przedstawione niżej wyniki uzyskano dla dwóch scenariuszy meteorologicznych:

- a) umiarkowanego wiatru północno-zachodniego przy neutralnych warunkach równowagi atmosferycznej oraz
- b) umiarkowanego wiatru zachodniego przy neutralnej stabilności atmosfery.

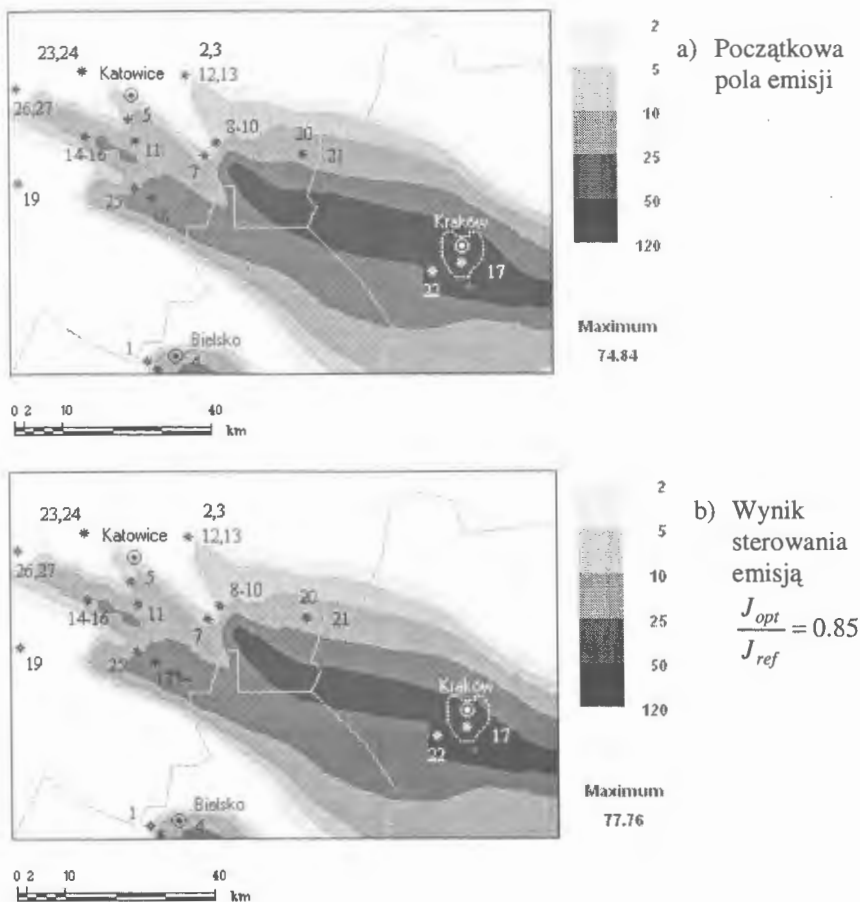
W każdym przypadku przedział czasowy sterowania wynosił 12h. Czas obliczeń związany z poszukiwaniem optimum, dla obu rozważanych scenariuszy nie przekraczał 0.5 min. W tab. 1 podano liczbę iteracji algorytmu optymalizacyjnego oraz procentową redukcję początkowej wartości wskaźnika jakości dla każdego scenariusza.

Tablica 1. Ogólne wyniki optymalizacji dla wybranych scenariuszy

Scenariusz	Liczba iteracji	Wskaźnik jakości		Redukcja wskaźnika
		w. początkowa	w. końcowa	
A	4	78.2	71.6	0.89
B	3	6.84	5.07	0.74

Rysunek 2 przedstawia w formie graficznej wyniki optymalizacji dla scenariusza A oraz ich interpretację. Ilustruje on różnice w rozkładzie koncentracji SO_2 dla nominalnego poziomu emisji (a) oraz dla zmodyfikowanego pola emisji, odpowiadającego rozwiązaniu optymalnemu (b). Różnice w obu rozkładach można zauważyć przede wszystkim w obszarze Krakowa (w tym obszarze funkcja wagowa terenu $w(x, y) = 1$), który decyduje o wartości wskaźnika jakości. Obniżenie poziomu koncentracji SO_2 w tym obszarze powoduje odpowiednią redukcję wartości wskaźnika, podaną w tab. 2.

Rysunek 3(a) przedstawia rozkład zmiennej sprzężonej, odpowiadający temu samemu scenariuszowi. Może on równocześnie stanowić podstawę do interpretacji znaczenia tej zmiennej w całym zadaniu sterowania. Źródła sterowane, których lokalizacja odpowiada wysokim wartościom zmiennej p , mają dominujący wpływ na wartość wskaźnika i są kandydatami do redukcji emisji, przy danej sytuacji meteorologicznej. Z kolei emitory zlokalizowane w obszarze niewielkich wartościach zmiennej p mogą przejmować część mocy ze źródeł, w których następuje redukcja. Potwierdza to rys 3(b), który pokazuje zmiany w poziomie produkcji (a więc i emisji) w poszczególnych źródłach, określone przez algorytm optymalizacyjny dla danego scenariusza.



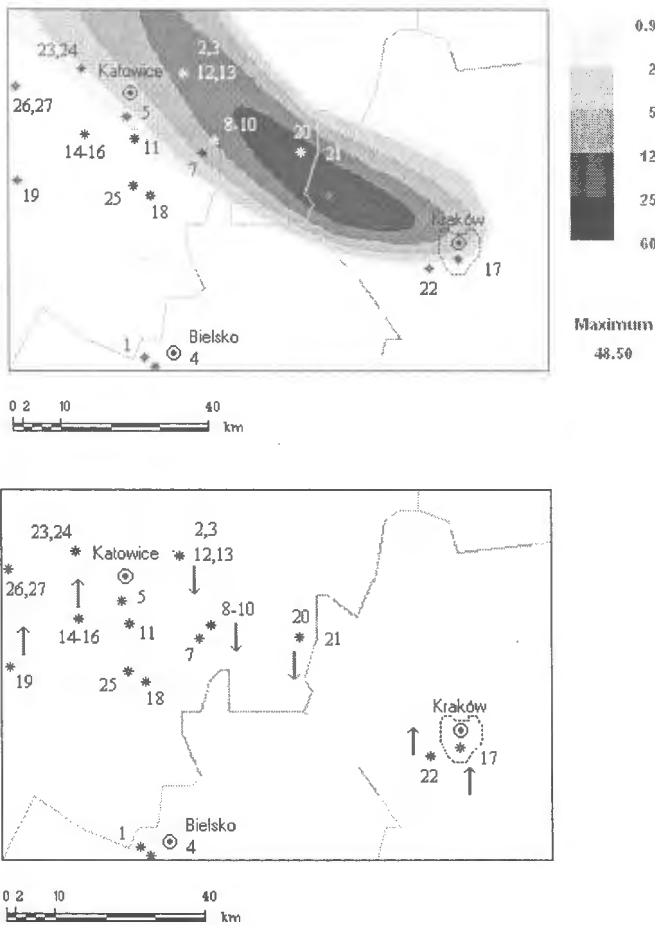
Rysunek 2. Zmiana koncentracji SO_2 dla scenariusza A

W drugiej części tab. 2 zestawiono wyniki ilościowe dotyczące uzyskanych rozwiązań optymalnych dla obu scenariuszy meteorologicznych. Rezultaty przedstawiono jako względne zmiany poziomu produkcji źródeł sterowanych, odpowiadające otrzymanym rozwiązaniom optymalnym (zmiany te odniesiono do nominalnego poziomu emisji, który przyjęto jako wartość początkową). Zmiany poziomu emisji dla scenariusza A odpowiadają wynikom przedstawionym graficznie na rysunkach 2–3. W przypadku scenariusza B, jedynym emitorem, w którym nastąpiła redukcja poziomu emisji, jest źródło 22. Przy wietrze zachodnim, źródło to – o stosunkowo niewielkiej wysokości – ma dominujący udział w oddziaływaniu na obszar chroniony. Z drugiej strony, ponieważ pozostałe największe źródła nie wpływają, przy tym kierunku wiatru, na wartość wskaźnika – mogą przejść odpowiednią część produkcji źródła 22. Dzięki temu, uzyskuje się w tym przypadku

relatywnie większą redukcję początkowej wartości wskaźnika jakości (porównaj tab. 1).

Tablica 2. Charakterystyki emisji źródeł oraz wyniki sterowania

No.	Emitor	Współrz.	Wys. [m]	Emisja [kg/h]	Wsp. sterowania	
					A	B
1.	Bielsko-Biała	(14,2)	160	426.91	1.00	1.00
2.	Będzin A	(18,31)	95	94.89	1.00	1.00
3.	Będzin B	(18,31)	135	132.82	1.00	1.00
4.	Bielsko-Komorowice	(15,1)	250	426.9	1.00	1.00
5.	Chorzów	(12,27)	100	363.66	1.00	1.00
6.	Halemba	(8,25)	110	569.24	1.00	1.00
7.	Jaworzno I	(20,23)	152	284.61	1.00	1.00
8.	Jaworzno IIA	(21,24)	100	573.60	1.00	1.00
9.	Jaworzno IIB	(21,24)	120	664.08	0.80	1.00
10.	Jaworzno III	(15,1)	300	6324.60	0.80	1.04
11.	Katowice	(18,31)	95	1106.81	1.10	1.01
12.	Łagisza A	(18,31)	160	948.69	1.00	1.01
13.	Łagisza B	(18,31)	200	1359.79	0.90	1.01
14.	Łaziska I	(8,20)	200	1660.21	1.10	1.00
15.	Łaziska II	(8,20)	160	758.95	1.00	1.00
16.	Łaziska III	(8,20)	100	727.95	1.00	1.00
17.	Łęg	(46,12)	260	1106.81	1.10	1.00
18.	Miechowice	(14,17)	68	161.28	1.00	1.00
19.	Rybnik	(1,20)	300	4711.83	1.25	1.00
20.	Siersza A	(30,31)	150	1929.00	0.80	1.02
21.	SierszaB	(30,23)	260	2055.49	0.80	1.02
22.	Skawina	(43,11)	120	1992.25	1.10	0.82
23.	Szombierki A	(9,31)	110	164.44	1.00	1.00
24.	Szombierki B	(9,31)	120	170.76	1.00	1.00
25.	Tychy	(13,19)	120	110.68	1.00	1.00
26.	Zabrze A	(2,29)	60	205.55	1.00	1.00
27.	Zabrze B	(2,29)	120	221.36	1.00	1.00



Rysunek 3. Rozkład zmiennej sprężonej (a) oraz zmiany poziomu emisji źródeł (b)

Uzyskane wyniki potwierdzają możliwości praktycznego wykorzystania dynamicznych modeli propagacji zanieczyszczeń powietrza do realizacji algorytmów sterowania emisją. Efektywność działania algorytmu optymalizacyjnego oraz uzyskana dokładność ostatecznych wyników umożliwiają przyszłe wykorzystanie omawianego podejścia w systemach wspomaganie decyzji.

Istotnym warunkiem, który wykorzystano w rozważanym przypadku, jest różniczkowalność funkcji celu. W przypadku nieróżniczkowalnych zadań optymalizacji, do zrealizowania algorytmu sterowania optymalnego mogą być wykorzystane dedykowane do konkretnego problemu metody heurystyczne lub algorytmy genetyczne.

Literatura

- Ciechanowicz W. i in. (1996) Energy and environment – problems of sustainable development. *Control and Cybernetics*, 1261–1271.
- Holnicki P., Kałuszko A., Żochowski A. (1993) A multilayer computer model for air quality forecasting in urban/regional scale. *Control and Cybernetics*, 5–28.
- Holnicki P. (1995) A shape preserving interpolation: applications to semi-Lagrangian advection. *Monthly Weather Review*, 862–870.
- Holnicki P., Żochowski A., Warchałowski A. (2001) Regional-scale air pollution dispersion model. *Environment Protection Engineering*, 133–145.
- Holnicki P., Kałuszko A. (2003) A decision support system for air quality control based on soft computing methods. *Applied Decision Support with Soft Computing* (X. Yu, J. Kacprzyk, ed.), Springer, Berlin, 290–307.
- Holnicki P., Nahorski Z., Żochowski A. (2000) *Modelowanie procesów środowiska naturalnego*. Wyd. WSISiZ, Warszawa.
- Lions J.L., Magenes E. (1968) *Problems aux limites non homogenes*. Dunod, Paris.
- Marchuk G.I. (1995) *Adjoint Equations and Analysis of Complex System*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Pschenitchny B.N. (1983) *Metod linearizacji* (Russian). Nauka, Moskwa.

IBS PAN *Seria*

45187

Bibl. podręczna

ISSN 0208-8028

ISBN 83-85847-92-8

**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: biblioteka@ibspan.waw.pl**