

78/2011

**Raport Badawczy**

**RB/36/2011**

**Research Report**

**Metoda efektywnego rozdziału  
środków na redukcję emisji  
dwutlenku węgla dla danego  
zbioru źródeł**

**A. Kałuszko**

**Instytut Badań Systemowych  
Polska Akademia Nauk**

**Systems Research Institute  
Polish Academy of Sciences**



# **POLSKA AKADEMIA NAUK**

## **Instytut Badań Systemowych**

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 3810100

fax: (+48) (22) 3810105

Kierownik Zakładu zgłaszający pracę:  
Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski

Warszawa 2011

ANDRZEJ KAŁUSZKO  
Instytut Badań Systemowych PAN  
ul. Nowelska 6, 01-447 Warszawa

## METODA EFEKTYWNEGO ROZDZIAŁU ŚRODKÓW NA REDUKCJĘ EMISJI DWUTLENKU WĘGLA DLA DANEGO ZBIORU ŹRÓDEŁ

### Streszczenie

W pracy zaproponowano metodę przydziału technologii redukcji emisji CO<sub>2</sub> do źródeł emisji. Celem stosowania metody jest stworzenie efektywnej, długookresowej strategii redukcji emisji dla zbioru zakładów produkcyjnych (źródeł), emitujących do atmosfery dwutlenek węgla. Zadanie polega na wyznaczeniu strategii redukcji sumarycznej emisji do wyznaczonego poziomu w zadanym okresie, tak, by koszty redukcji były minimalne. Metoda jest oparta na programowaniu dynamicznym. Działanie metody zilustrowano na przykładzie obliczeniowym obejmującym emisję 20 największych elektrowni węglowych w Polsce.

### 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach miały miejsce na świecie liczne działania mające na celu ograniczenie ilości emitowanych do atmosfery tzw. gazów cieplarnianych związanych z działalnością człowieka w różnym zakresie. Pierwszym ważnym etapem tych działań była konferencja w Kyoto zorganizowana w roku 1997, zakończona protokołem, który ratyfikowało do roku 2005 ponad 140 państw, w tym Polska, odpowiadających za ponad 60% emisji dwutlenku węgla. Po niej nastąpiły liczne mniej znane konferencje i umowy międzynarodowe, a także ustalenia wewnętrzne obowiązujące w Unii Europejskiej. W ich wyniku Polska jest zobowiązana do znacznego – 20% zredukowania emisji dwutlenku węgla, co pociągnie za sobą ogromne nakłady na inwestycje w nowe technologie, zwłaszcza w energetyce zawodowej.

Sytuacja Polski na tle innych krajów UE w dziedzinie emisji gazów cieplarnianych jest relatywnie bardzo trudna i ma przyczyny w wieloletnich zaniedbaniach we wprowadzaniu nowoczesnych technologii wytwarzania energii (w tym budowy elektrowni jądrowych) i w zaniechaniach w zakresie redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych przy jednoczesnym ogromnym rozwoju przemysłu ciężkiego, zwłaszcza hutnictwa i energetyki, opartych głównie na wykorzystaniu węgla kamiennego i brunatnego.

W tej sytuacji redukcja emisji CO<sub>2</sub> o 20% w skali całego kraju wyrasta na jeden z głównych problemów gospodarczych Polski w najbliższych latach. Problem jest na tyle nowy, że nie ma jeszcze analiz i opracowań naukowych dotyczących skutków ograniczania emisji na zasadach przyjętych przez Polskę w roku 2008. Ponadto nie ma w tej chwili w Polsce żadnego ośrodka badawczego, po likwidacji RCSS (Rządowego Centrum Studiów Strategicznych), przygotowującego analizy w tej kwestii. Przy Ministerstwie Gospodarki działa co prawda Społeczna Rada Narodowego Programu Redukcji Emisji, ale jest to ciało nastawione raczej na wymianę opinii, w wielu przypadkach bardzo interesujących i publikację gotowych dokumentów niż na prowadzenie własnych badań [4]. Tymczasem oceny niektórych ekonomistów są alarmujące - mówią nawet o możliwym 2% spadku PKB Polski związanym z tak znaczną redukcją emisji CO<sub>2</sub>. Na uwagę zasługują zwłaszcza opinie prof. Krzysztofa Żmijewskiego z Politechniki Warszawskiej, sekretarza generalnego

Spółecznej Rady Narodowego Programu Redukcji Emisji. Niestety, są one przedstawiane głównie w prasie branżowej [5] i codziennej, na konferencjach, stronach internetowych, brak jest natomiast poważnej publikacji naukowej.

Niezbędne staje się zatem pilne opracowanie metod, pozwalających na efektywne wykorzystanie środków na redukcję emisji. Zmniejszenie wydatków nawet w niewielkim stopniu daje, przy tej skali problemu, poważne oszczędności w skali kraju. Opisana w niniejszej pracy metoda nie ma na celu wyznaczenia optymalnego planu redukcji emisji CO<sub>2</sub> – może być natomiast narzędziem do porównywania różnych scenariuszy redukcji. Jedną z zasadniczych trudności ze stosowaniem takich metod jest brak rzetelnych danych o kosztach technologii redukcji emisji i kosztach zakupu praw do emisji CO<sub>2</sub>, co można w tym przypadku wytłumaczyć faktem, że te prawa staną się przedmiotem handlu międzynarodowego i ich cena rynkowa będzie silnie uzależniona od podaży i popytu a także światowej aktywności gospodarczej. Nie wiadomo także do tej pory, jaki będzie koszt instalacji CCS (Carbon Capture and Storage) do wychwytywania i składowania CO<sub>2</sub>, bo żadna taka instalacja nie działa jeszcze na skalę przemysłową.

## 2. Sformułowanie zadania

Zadanie polega na takim przydzieleniu technologii redukcji emisji do wszystkich rozpatrywanych źródeł, by osiągnąć pożądaną stopień redukcji emisji CO<sub>2</sub> w zadanym czasie przy najmniejszych kosztach. W celu rozwiązania tak postawionego zadania w pierwszym etapie rozwiązujemy zadanie sformułowane następująco: wyznaczyć przydział technologii redukcji emisji do wszystkich rozpatrywanych źródeł tak, by sumaryczna emisja CO<sub>2</sub> ze wszystkich źródeł w zadanym horyzoncie czasowym  $T$  była minimalna, przy zadanym ograniczeniu na całkowite koszty inwestycji i eksploatacji technologii redukcji emisji.

Zakładamy, że rozpatrujemy  $N$  źródeł emisji CO<sub>2</sub>. Dysponujemy  $M$  technologiami redukcji emisji, przy czym każda z technologii jest scharakteryzowana przez efektywność redukcji emisji.

Stosujemy następujące oznaczenia:

$N$  – liczba rozpatrywanych źródeł,

$M$  – liczba dostępnych technologii,

$T$  – horyzont planowania podzielony na przedziały  $t = 1, 2, \dots, T$

$C_t$  – fundusze do dyspozycji w przedziale  $t$ , przy czym  $C_1 = C_2 = \dots = C_T$ ,

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

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

Wprowadzenie nowej technologii jest związane z ponoszeniem kosztów inwestycyjnych, dzielących się na koszty stałe i koszty zmienne oraz kosztów operacyjnych (eksploatacyjnych). Używamy następujących oznaczeń kosztów jednostkowych (liczonych na jednostkę emisji) związanych z wprowadzeniem technologii  $j$  w zakładzie  $i$ :

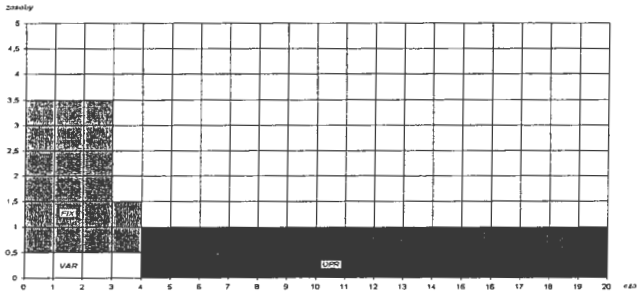
$f_{ijfix}^1$  - koszty inwestycyjne stałe,

$f_{ijvar}^1$  - koszty inwestycyjne zmienne,

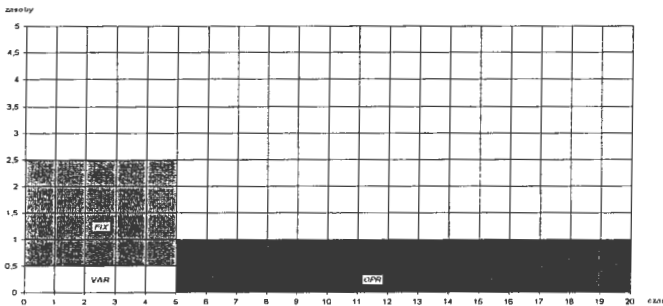
$f_{ij}^2$  - koszty operacyjne.

Koszty inwestycyjne stałe (np. zakup aparatury) są rozłożone w czasie. Część kosztów stałych przypadająca na jeden okres nie może być wyższa niż określona z góry wartość. Koszty inwestycyjne zmienne (np. płace pracowników) są ponoszone w każdym

przedziale czasu trwania inwestycji. Koszty operacyjne są ponoszone w każdym przedziale czasu eksploatacji technologii. Rys. 1, 2 przedstawiają różne przypadki strategii inwestowania. Przypadek 1 (rys. 1) charakteryzuje się całkowitymi kosztami inwestycyjnymi w wysokości 12 jednostek i eksploatacją technologii w 16 przedziałach czasowych, natomiast przypadek 2 (rys. 2) ma całkowite koszty inwestycyjne w wysokości 12,5 jednostek i eksploatację technologii w 15 przedziałach czasowych. Zatem przypadek 1 charakteryzuje się lepszą relacją kosztów inwestycyjnych do stopnia redukcji emisji w źródle w zadanym czasie.



Rys. 1. Rozkład kosztów inwestycyjnych i operacyjnych w czasie – przypadek 1.



Rys. 2. Rozkład kosztów inwestycyjnych i operacyjnych w czasie – przypadek 2.

Sumaryczną emisję CO<sub>2</sub> pochodzącą ze wszystkich źródeł w horyzoncie  $T$  można zapisać w postaci następującej funkcji  $F$ :

$$F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ijt} \cdot u_i \cdot (1 - e_j) \quad (1)$$

gdzie  $x_{ijt}$  jest zmienną binarną, zdefiniowaną następująco:

$$x_{ijt} \in \{0, 1\}$$

$$x_{ijt} = 1, \text{ jeśli w przedziale } t \text{ jest eksploatowana technologia } j \text{ w źródle } i,$$

$$x_{ijt} = 0, \text{ w przypadku przeciwnym.}$$

Koszty inwestycyjne, związane z wprowadzeniem technologii  $j$  do źródła  $i$  w przedziale  $t$  są podane przez wzór:

$$\sum_{j=1}^M y_{ijt} \cdot f_{ijt}^1 \cdot u_i \quad (2)$$

$y_{ijt}$  jest zmienną binarną, zdefiniowaną następująco:

$$y_{ijt} \in \{0, 1\}$$

$y_{ijt} = 1$ , jeśli w przedziale  $t$  są ponoszone koszty inwestycyjne, związane z wprowadzeniem technologii  $j$  w źródle  $i$ ,

$y_{ijt} = 0$ , w przypadku przeciwnym.

Zmienne  $x_{ijt}$  i  $y_{ijt}$  muszą spełniać ograniczenie

$$x_{ijt} + y_{ijt} \leq 1, \text{ dla } i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M, t = 1, 2, \dots, T$$

Koszty inwestycyjne dla źródła  $i$  w całym okresie  $T$  są podane przez wzór:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M y_{ijt} \cdot f_{ijt}^1 \cdot u_i \quad (3)$$

gdzie

$f_{ijt}^1$  - jest sumą kosztów inwestycyjnych zmiennych i części kosztów inwestycyjnych stałych, związanych z wprowadzeniem technologii  $j$  do źródła  $i$ , przypadającą na przedział  $t$ .

$$f_{ijt}^1 = f_{ijt}^{\text{var}} + \alpha_{ijt} \cdot f_{ijt}^{\text{fix}} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^T \alpha_{ijt} = 1, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M \quad (4a)$$

Koszty inwestycyjne dla wszystkich źródeł w przedziale  $t$  podaje wzór:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{ijt} \cdot f_{ijt}^1 \cdot u_i \quad (5)$$

Koszty operacyjne technologii  $j$  dla źródła  $i$  w przedziale  $t$  są podane przez wzór:

$$\sum_{j=1}^M x_{ijt} \cdot f_{ijt}^2 \cdot u_i \quad (6)$$

gdzie

$$f_{ijt}^2 = f_{ij}^2$$

Koszty operacyjne dla wszystkich źródeł w przedziale  $t$  podaje wzór:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ijt} \cdot f_{ijt}^2 \cdot u_i \quad (7)$$

Suma kosztów operacyjnych i kosztów inwestycyjnych dla wszystkich źródeł w przedziale  $t$  musi być większa od ograniczenia na dostępne środki  $C_t$ .

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (x_{ijt} \cdot f_{ijt}^2 + y_{ijt} \cdot f_{ijt}^1) \cdot u_i \leq C_t, \quad t=1, 2, \dots, T \quad (8)$$

Rozpatrywane zadanie przydziału technologii redukcji emisji do źródeł można zdefiniować jako minimalizację funkcji (1) przy ograniczeniach (8).

### 3. Zastosowanie programowania dynamicznego do rozwiązania zadania

Opisane powyżej zadanie, nawet przy niewielkiej liczbie źródeł i technologii, charakteryzuje się dużą liczbą zmiennych binarnych  $x_{ijt}$  i  $y_{ijt}$  oraz zmiennych ciągłych  $f_{ijt}^1$  - jego analityczne rozwiązanie jest bardzo trudne, o ile w ogóle możliwe. Dlatego w dalszym ciągu zostanie przedstawiona możliwość zastosowania metody przybliżonej opartej na programowaniu dynamicznym, zgodnie ze schematem opisanym w [1], do rozwiązania postawionego zadania.

Na potrzeby zastosowania programowania dynamicznego dyskretyzujemy dostępne zasoby. Dyskretyzacja zasobów względem osi czasu jest naturalna, ponieważ tak są zdefiniowane zasoby (środki). Dyskretyzacja zasobów względem osi wartości jest dostosowana do możliwości obliczeniowych.

Uzyskanie rozwiązania przebiega na dwóch poziomach, zgodnie ze schematem opisanym poniżej. Na poziomie 1 stosujemy metodę programowania dynamicznego do wyznaczania kolejnych najlepszych rozwiązań częściowych przez rozdział zasobów pomiędzy źródła już uwzględnione w rozwiązaniu częściowym i nowo rozpatrywane źródło. Na poziomie 2 (niższym) wyznaczamy najlepsze rozwiązanie dla pojedynczego źródła przez przegląd rozwiązań.

#### **ALGORYTM ROZWIĄZANIA**

**Krok 1.** Utwórz listę wszystkich rozpatrywanych źródeł.

**Krok 2.** Wybierz pierwsze źródło z listy.

**Krok 3.** Dla wszystkich poziomów dostępnych zasobów wyznacz najlepsze rozwiązanie dla wybranego źródła, przez przegląd wszystkich rozwiązań. Zapamiętaj najlepsze rozwiązanie dla wszystkich poziomów zasobów.

**Krok 4.** Jeśli nie ma już na liście źródeł do rozpatrzenia - zakończ. W przeciwnym przypadku przejdź do następnego kroku.

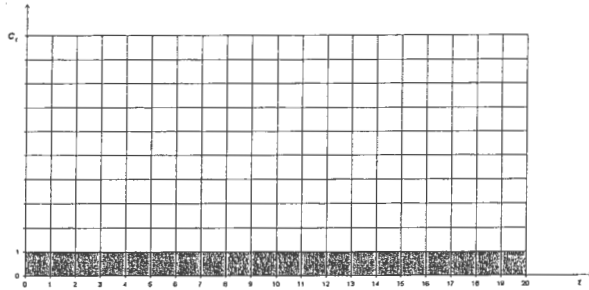
**Krok 5.** Wybierz kolejne źródło z listy.

**Krok 6.** Dla wszystkich poziomów dostępnych zasobów wykonaj następującą procedurę. Podziel zasoby na 2 części w następujący sposób:

- I część przydziel do zapamiętanego rozwiązania, uwzględniającego dotychczas rozpatrywane źródła,
- II część przydziel do nowo rozpatrywanego źródła.

Przez przegląd wszystkich rozwiązań wyznacz najlepsze rozwiązanie dla każdego podziału i dla każdego poziomu zasobów. Zapamiętaj najlepsze rozwiązania. Przejdź do kroku 4.

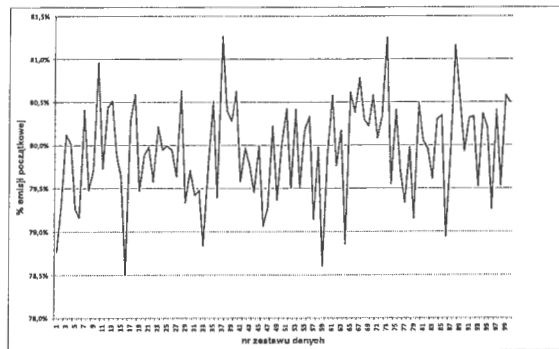
W proponowanej metodzie rozwiązania, zwanej dalej „podstawową”, jednostka zasobu jest zdefiniowana w ten sposób, że składa się z jednostkowej wartości środków w każdym przedziale całego rozpatrywanego okresu  $T$ , jak zaznaczono na rys. 3.



Rys. 3. Jednostka zasobu (zaciemnione pola).

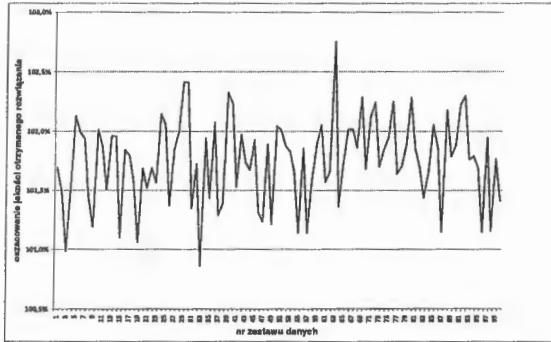
W wyniku zastosowania powyższej metody uzyskujemy rozwiązanie – przydział technologii do wszystkich źródeł, które redukuje sumaryczną emisję w zadanym okresie. Rysunek 4 pokazuje stopień redukcji początkowej emisji dla losowo wygenerowanego zestawu 100 zadań testowych o następujących parametrach: liczba źródeł  $N = 10$ , liczba technologii  $M = 5$ , o efektywnościach redukcji emisji odpowiednio 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.8, horyzont czasowy  $T = 20$ , ograniczenie zasobów  $C_i = 20$  jednostek.

Jakość otrzymanego rozwiązania można ocenić przez porównanie go z rozwiązaniem uzyskanym przez użycie innej metody - opisanej w pracy [3]. Przedstawiona tam metoda daje rozwiązanie o większym stopniu redukcji emisji, ale niedopuszczalne – jego użyteczność polega na możliwości użycia do oceny innego rozwiązania. Rysunek 5 pokazuje porównanie jakości rozwiązań uzyskanych przez te dwie metody wyrażony w procentach. Rozwiązanie przy użyciu metody podstawowej opisanej w niniejszej pracy jest co najwyżej o kilka % gorsze od najlepszego.



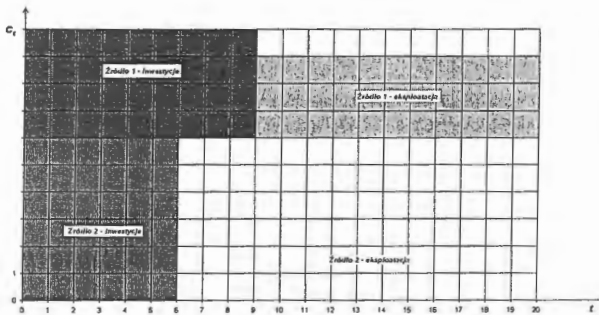
Rys. 4. Emisja po redukcji jako % emisji początkowej.



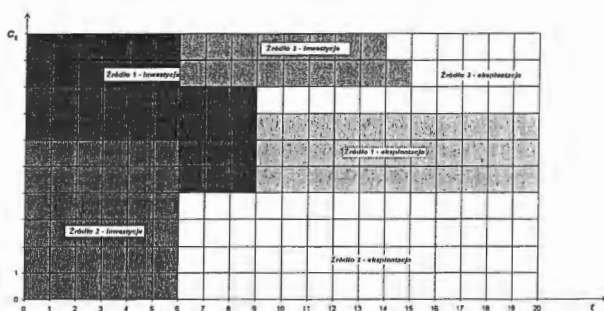


Rys. 5. Oszacowanie jakości otrzymanego rozwiązania.

Mankamentem metody podstawowej jest to, że w niepełnym stopniu wykorzystuje zasoby, tak jak pokazano na rys. 6. Powodem tego jest sztywny przydział zasobów do każdego źródła osobno. Można to zmienić i udoskonalić metodę w ten sposób, że przy przydziale zasobów do kolejnego źródła uwzględniamy zasoby niewykorzystane przez poprzednio rozpatrywane źródła. Powoduje to pełniejsze wykorzystanie zasobów i tym samym uzyskanie lepszego rozwiązania. Dla przypadku pokazanego na rys. 7 zmiana polega na przydziale dodatkowych zasobów niewykorzystanych przez źródło nr 1 i źródło nr 2 do źródła nr 3. Trzeba zauważyć, że poprawa jakości rozwiązania jest uzyskiwana kosztem wydłużenia czasu obliczeń.



Rys. 6. Możliwy rozkład czasowy kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych dla dwóch przykładowych źródeł – metoda podstawowa.

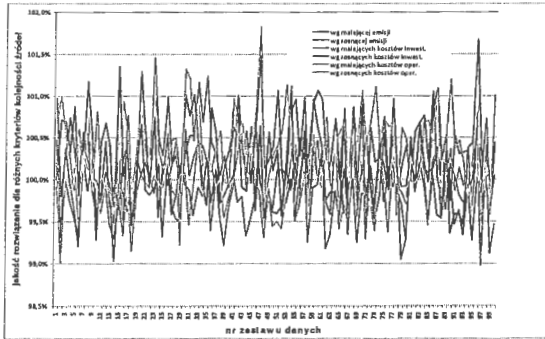


Rys. 7. Rozkład czasowy kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych dla trzech przykładowych źródeł – metoda udoskonalona.

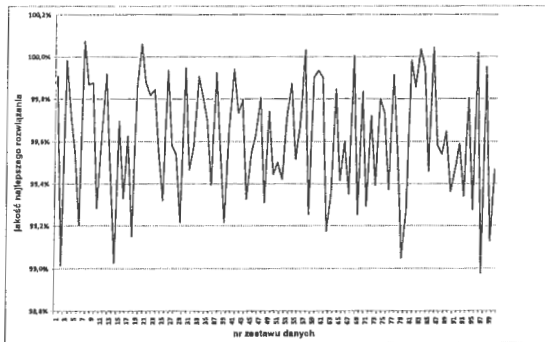
Opisana powyżej modyfikacja powoduje, że odchodzimy od „kanonicznego” programowania dynamicznego, gdzie kolejność rozpatrywania źródeł nie ma znaczenia. Eksperymenty obliczeniowe potwierdziły, że przy różnej kolejności rozpatrywania źródeł otrzymujemy różne rozwiązania. Trudno jest jednak podać, według jakiego kryterium tworzyć kolejność rozpatrywania źródeł. Sprawdzono 6 różnych reguł tworzenia kolejności źródeł:

1. według wielkości emisji (im wyższa tym wyżej na liście),
2. według wielkości emisji (im niższa tym wyżej na liście),
3. według uśrednionych kosztów inwestycyjnych (im wyższe tym wyżej na liście),
4. według uśrednionych kosztów inwestycyjnych (im niższe tym wyżej na liście),
5. według uśrednionych kosztów operacyjnych (im wyższe tym wyżej na liście),
6. według uśrednionych kosztów operacyjnych (im niższe tym wyżej na liście).

Żadna z tych reguł nie dała najlepszego rozwiązania dla rozpatrywanego zestawu danych – jak pokazano na rys. 8. Najlepszym wyjściem z tej sytuacji jest wykonanie obliczeń dla wszystkich 6 reguł tworzenia listy źródeł i wybór najlepszego rozwiązania. Rys. 9 pokazuje, jaka jest relacja tak wyznaczonego rozwiązania do tego uzyskanego bez szeregowania źródeł. W najlepszym przypadku jest lepsze o ok. 1%. Wydaje się to być niewielką poprawą, ale trzeba pamiętać, że w przypadku redukcji emisji CO<sub>2</sub> chodzi o ogromne sumy i nawet minimalna poprawa rozwiązania ma znaczenie.



Rys. 8. Porównanie jakości rozwiązań dla 6 reguł tworzenia listy źródeł.



Rys. 9. Porównanie jakości najlepszego rozwiązania dla 6 reguł szeregowania źródeł do rozwiązania uzyskanego bez szeregowania źródeł.

Opisaną powyżej metodę można zastosować do rozwiązania zadania pierwotnego – jak wyliczyć minimalne koszty redukcji emisji CO<sub>2</sub>, by osiągnąć pożądaną redukcję emisji, np. o 20%. Wykonuje się to przez powtórzenie obliczeń dla wielu poziomów ograniczenia zasobów i otrzymanie krzywej, jak pokazano to na dla przykładu obliczeniowego na rys. 10, który przedstawia zależność pożądanego poziomu redukcji emisji od wymaganych nakładów na redukcję emisji.

#### 4. Przykład obliczeniowy

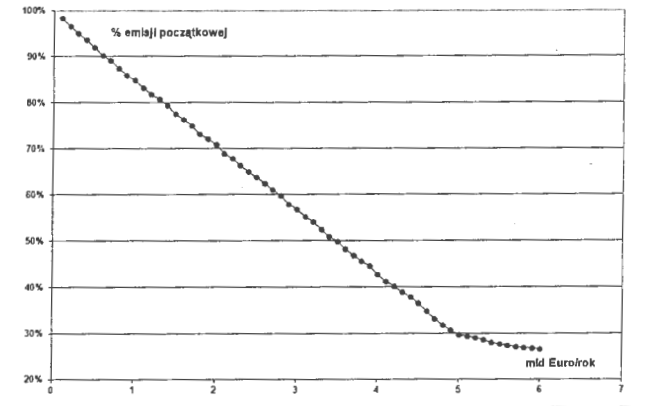
Proponowaną metodę sprawdzono na przykładzie praktycznym zbioru 20 największych elektrowni w Polsce opalanych węglem. Wielkości rocznej emisji CO<sub>2</sub> są podane w tabeli 1. W tabeli 2 podano dane o efektywności i kosztach technologii redukcji emisji CO<sub>2</sub>.

Tabela 1. Wielkości rocznej emisji CO<sub>2</sub> dla 20 największych elektrowni w Polsce.

Nazwa	Paliwo	Moc w MW	Emisja roczna CO <sub>2</sub> w milionach ton
Belchatów	Węgiel brunatny	4320	35,3
Kozienice	Węgiel kamienny	2880	23,5
Turów	Węgiel brunatny	1900	15,6
Połaniec	Węgiel kamienny	1800	13,0
Rybnik	Węgiel kamienny	1775	12,8
Dolna Odra	Węgiel kamienny	1740	12,6
Jaworzno III	Węgiel kamienny	1635	11,8
Opole	Węgiel kamienny	1530	11,0
Pątnów	Węgiel brunatny	1200	9,8
Łaziska	Węgiel kamienny	1155	8,3
Siersza	Węgiel kamienny	810	5,8
Ostrołęka	Węgiel kamienny	720	5,2
Łagisza	Węgiel kamienny	710	5,1
Ostrołęka	Węgiel kamienny	650	4,7
Siekierki	Węgiel kamienny	620	4,5
Adamów	Węgiel brunatny	600	4,9
Skawina	Węgiel kamienny	490	3,5
Konin	Węgiel brunatny	490	4,0
Stalowa Wola	Węgiel kamienny	350	2,5
Zerań	Węgiel kamienny	350	2,5

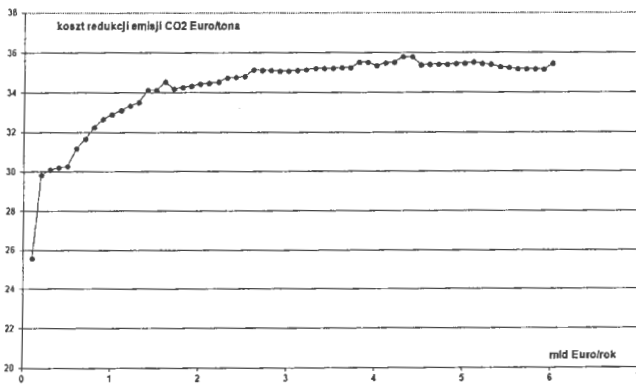
Tabela 2. Efektywności i koszty technologii redukcji emisji CO<sub>2</sub>

Technologia	Efektywność w %	Koszty inwestycyjne	Koszty operacyjne
biomasa	15	100 Euro/kW	10 Euro/kW
gaz	40	300 Euro/kW	160 Euro/kW
CCS	100	600 Euro/kW	30 Euro/tona CO <sub>2</sub> emisji pocz.
biomasa + CCS	100	610 Euro/kW	10 Euro/kW + 34 Euro/tona CO <sub>2</sub> emisji pocz.
gaz + CCS	100	660 Euro/kW	160 Euro/kW + 24 Euro/tona CO <sub>2</sub> emisji pocz.
zakup	100	-	40 Euro/tona CO <sub>2</sub>



Rys. 10. Poziom redukcji emisji CO<sub>2</sub> w zależności od nakładów.

Na rysunku 10 pokazano zależność stopnia redukcji emisji w zależności od wielkości nakładów na redukcję emisji. Zaprezentowaną krzywą otrzymano przez powtórzenie obliczeń dla wielu poziomów ograniczenia. Krzywa ma w przeważającym zakresie zmian osi rzędnych kształt zbliżony do liniowego, co może ułatwić jej ewentualna aproksymację.



Rys. 11. Średnia cena redukcji emisji jednej tony CO<sub>2</sub> w zależności od nakładów.

Rysunek 11 przedstawia średnią cenę redukcji emisji jednej tony CO<sub>2</sub> w zależności od nakładów na redukcję emisji. Cena zmienia się, bo w pierwszej kolejności są wykorzystywane tańsze technologie, takie jak spalanie biomasy, w dalszej kolejności są używane technologie coraz droższe, po wyczerpaniu możliwości zastosowania tańszych, co ma miejsce przy wyższych nakładach na redukcję emisji. Obliczenia wykazały, że przy

uwzględnionych danych liczbowych i obecnej cenie zakupu praw do emisji na poziomie 40 Euro/tona inwestowanie w technologie redukcji emisji jest opłacalne.

### 5. Podsumowanie

Skuteczna redukcja emisji zanieczyszczeń gazowych wymaga długotrwałych, kosztownych inwestycji w nowe technologie. Przy ograniczeniu środków, w dużej mierze publicznych, na takie inwestycje, konieczne staje się skuteczne zarządzanie dysponowanymi zasobami finansowymi, tak by ich wykorzystanie było jak najbardziej efektywne.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że opisana metoda rozdziału środków na technologie redukcji emisji może być pomocna przy podejmowaniu decyzji w sprawie opracowania strategii redukcji emisji CO<sub>2</sub>. W przypadku redukcji emisji CO<sub>2</sub> chodzi o ogromne koszty i nawet minimalne ich zmniejszenie uzasadnia poszukiwanie metod do tego prowadzących.

Opracowana metoda może być także zastosowana do tworzenia scenariuszy redukcji emisji gazów innych niż CO<sub>2</sub>, w tym tlenków siarki, emitowanych w dużej ilości przez polskie zakłady energetyczne oparte na węglu kamiennym i brunatnym. Polska jest zobowiązana do redukcji także tych gazów umowami międzynarodowymi. W przypadku redukcji emisji tlenków siarki konieczne jest przeformułowanie zadania, tak jak pokazano to w pracy [2].

### Literatura

- [1] Bellman R. E., Dreyfus S. E., *Applied Dynamic Programming*. Princeton University Press, 1962.
- [2] Kałuszko A., *Metoda wyznaczania strategii redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych oparta na programowaniu dynamicznym*. Studia i Materiały Polskiego Towarzystwa Zarządzania Wiedzą, tom 23, Bydgoszcz, 2009.
- [3] Kałuszko A., *Wspomaganie decyzji rozdziału środków na redukcję emisji zanieczyszczeń gazowych w długim horyzoncie czasowym*. Studia i Materiały Polskiego Towarzystwa Zarządzania Wiedzą, tom 33, Bydgoszcz, 2010.
- [4] Strona internetowa Społecznej Rady Narodowego Programu Redukcji Emisji przy Ministerstwie Gospodarki <http://www.rada-npre.pl>
- [5] Żmijewski K., *ETS – state of art. i konsekwencje*. Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, wentylacja, nr 10, 2008.



the 1990s, the number of people who have been employed in the public sector has increased in all countries. The increase in public sector employment has been particularly rapid in the United Kingdom, where the public sector has grown from 10.5% of the total labour force in 1980 to 17.5% in 1997.

There are a number of reasons for the increase in public sector employment. One reason is the growth of the welfare state. In many countries, the welfare state has expanded significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector. Another reason is the growth of the public sector in the services industry. In many countries, the public sector has grown rapidly in the services industry, particularly in the areas of health care and education.

There are a number of factors that have contributed to the growth of the public sector. One factor is the increase in the number of people who are aged 65 and over. In many countries, the number of people aged 65 and over has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector. Another factor is the increase in the number of people who are unemployed. In many countries, the number of people who are unemployed has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the increase in the number of people who are aged 65 and over. In many countries, the number of people aged 65 and over has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector. Another factor is the increase in the number of people who are unemployed. In many countries, the number of people who are unemployed has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the increase in the number of people who are aged 65 and over. In many countries, the number of people aged 65 and over has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector. Another factor is the increase in the number of people who are unemployed. In many countries, the number of people who are unemployed has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the increase in the number of people who are aged 65 and over. In many countries, the number of people aged 65 and over has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector. Another factor is the increase in the number of people who are unemployed. In many countries, the number of people who are unemployed has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the increase in the number of people who are aged 65 and over. In many countries, the number of people aged 65 and over has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector. Another factor is the increase in the number of people who are unemployed. In many countries, the number of people who are unemployed has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the increase in the number of people who are aged 65 and over. In many countries, the number of people aged 65 and over has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector. Another factor is the increase in the number of people who are unemployed. In many countries, the number of people who are unemployed has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the increase in the number of people who are aged 65 and over. In many countries, the number of people aged 65 and over has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector. Another factor is the increase in the number of people who are unemployed. In many countries, the number of people who are unemployed has increased significantly since the 1960s, and this has led to an increase in the number of people employed in the public sector.