

METODA EFEKTYWNEGO ZARZĄDZANIA ROZDZIAŁEM ŚRODKÓW NA REDUKCJĘ EMISJI GAZÓW CIEPLARNIANYCH

Andrzej Kaluszko

Instytut Badań Systemowych PAN
Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej i Zarządzania
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa

W pracy zaproponowano metodę przydziału technologii redukcji emisji CO₂ do źródeł emisji. Celem zastosowania metody jest stworzenie efektywnej, długookresowej strategii redukcji emisji dla zbioru zakładów produkcyjnych (źródeł), emitujących do atmosfery dwutlenek węgla. Zadanie można postawić na dwa sposoby: 1. wyznaczenie strategii redukcji sumarycznej emisji ze wszystkich źródeł w zadanym okresie, tak by poziom zredukowanej emisji był minimalny przy zadanych kosztach, 2. wyznaczenie 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 zestawie 100 losowo wyznaczonych zestawów danych.

Słowa kluczowe: środowisko, gazy cieplarniane, CO₂, redukcja emisji, optymalizacja, programowanie dynamiczne

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 różnych dziedzinach. 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% światowej 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 zredukowania emisji gazów cieplarnianych, 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, a jej przyczyną są wieloletnie zaniedbania we wprowadzaniu nowoczesnych technologii wytwarzania energii (w tym budowy elektrowni jądrowych) i w zaniechaniach w zakresie redukcji emisji zanieczyszczeń przy

jednoczesnym ogromnym rozwoju przemysłu ciężkiego, zwłaszcza hutnictwa i energetyki, opartych głównie na wykorzystaniu węgla kamiennego i brunatnego.

W tej sytuacji redukcja emisji CO₂ 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 (por. strona internetowa Społecznej Rady...). Tymczasem oceny niektórych ekonomistów są alarmujące - mówią nawet o możliwym 2% spadku PKB Polski związanym z tak znaczną redukcją emisji CO₂. Na uwagę zasługują zwłaszcza opinie prof. Krzysztofa Żmijewskiego z Politechniki Warszawskiej, sekretarza generalnego Społecznej Rady Narodowego Programu Redukcji Emisji. Niestety, są one przedstawiane głównie w prasie branżowej (Żmijewski, 2008) 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 o 1% daje, przy tej skali problemu, poważne oszczędności w skali kraju. Opisana w niniejszej pracy metoda nie ma na celu wyznaczenia optymalnego planu redukcji emisji CO₂ – 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 CO₂, 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 CO₂, 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 sumaryczna emisja CO₂ ze wszystkich źródeł w zadanym horyzoncie czasowym T była minimalna, przy ograniczeniu na całkowite koszty inwestycji i eksploatacji technologii redukcji emisji. Zadanie można też sformułować w inny sposób, bardziej przydatny praktycznie – jakie są minimalne nakłady, by osiągnąć pożądaną stopień redukcji emisji.

Zakładamy, że rozpatrujemy N źródeł emisji CO₂. 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.

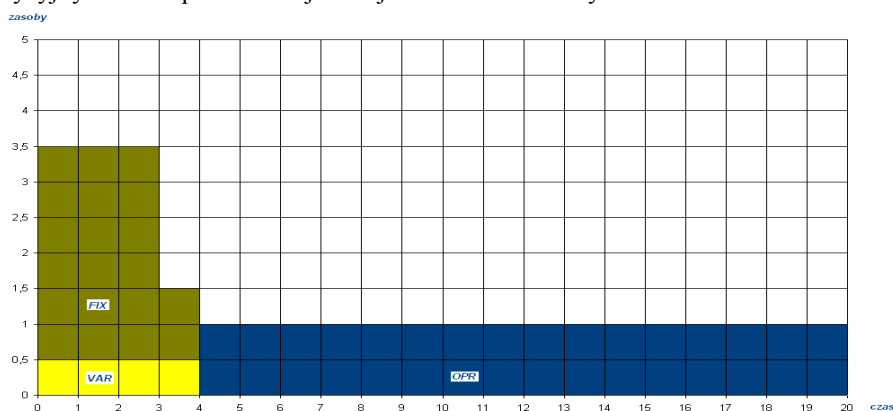
Wprowadzenie nowej technologii jest związane z ponoszeniem kosztów inwestycyjnych, dzielących się na koszty stałe i koszty zmienne oraz kosztów operacyjnych (eksploatacyjnych). Używamy następujących oznaczeń kosztów jednostkowych (liczonych na jednostkę emisji) związanych z wprowadzeniem technologii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

f_{ijfix}^1 - koszty inwestycyjne stałe,

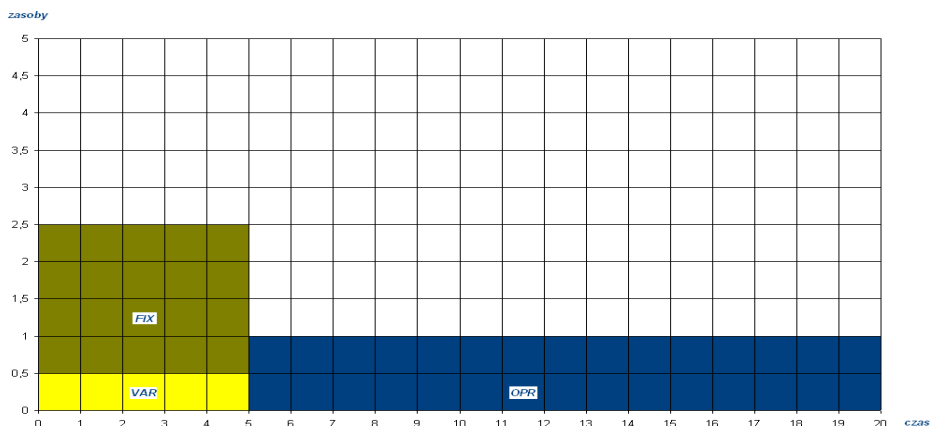
f_{ijvar}^1 - koszty inwestycyjne zmienne,

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 i 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 CO₂, 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:

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

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

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

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

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

gdzie 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 .

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

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

gdzie α_{ijt} jest udziałem kosztów inwestycyjnych stałych, przypadającym na przedział t , w całości kosztów inwestycyjnych stałych.

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 nie większa od ograniczenia na dostępne środki C_t .

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

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 $x_{ijt} \in \{0, 1\}$, $y_{ijt} \in \{0, 1\}$ i $f_{ijt}^1 \in \mathfrak{R}, f_{ijt}^1 \geq 0$.

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 Bellman, Dreyfus (1962), 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 rozwiązania dla wszystkich poziomów zasobów.

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

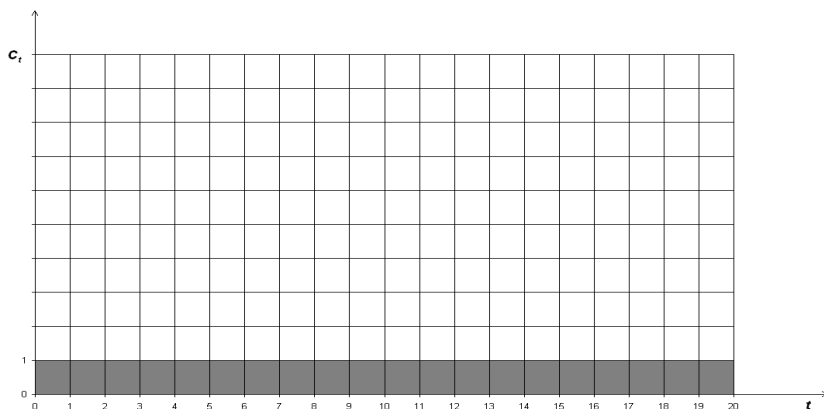
Krok 5. Wybierz kolejne źródło z listy.

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.

Dokładniejszy opis powyższego algorytmu jest podany w pracy Kałuszko (2009).

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 to zaznaczono na Rys. 3.

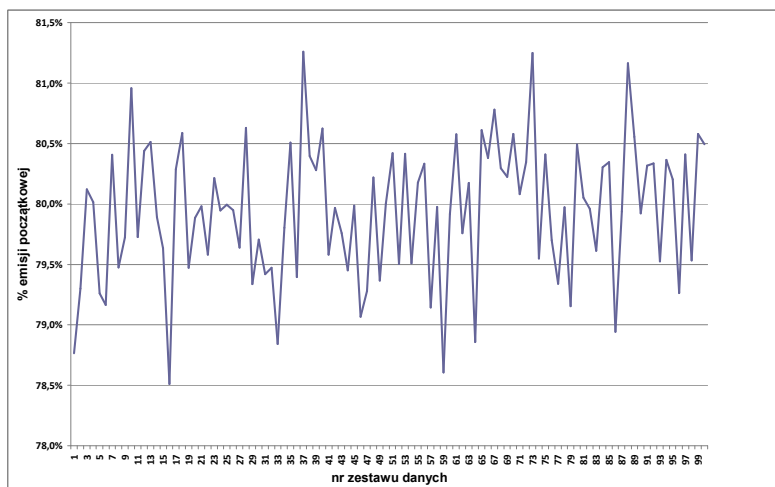


Rys. 3. Jednostka zasobu (zaciemnione pola)

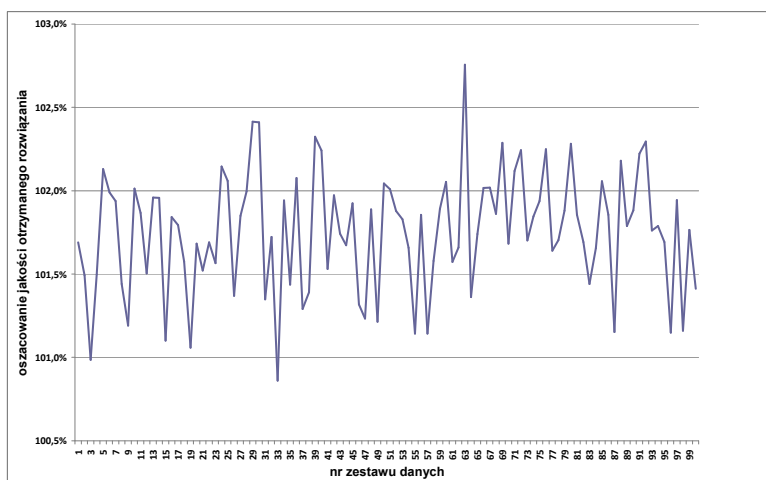
W wyniku zastosowania powyższej metody uzyskujemy rozwiązanie – przydział technologii do wszystkich źródeł, które redukuje sumaryczną emisję w danym okresie. Rys. 4 pokazuje stopień redukcji początkowej emisji dla losowo wygenerowanego zestawu 100 zadań testowych o następujących parametrach: liczba źródeł $N = 10$, 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 $C_t = 20$ jednostek.

Jakość otrzymanego rozwiązania można ocenić przez porównanie go z rozwiązaniem uzyskanym przez użycie innej metody - opisanej w pracy Kałuszko (2010). Przedstawiona tam metoda daje rozwiązanie o większym stopniu redukcji emisji, ale niedopuszczalne – jego użyteczność polega na możliwości użycia do oceny innego rozwiązania. Rys. 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.

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. 4. Emisja po redukcji jako % emisji początkowej.

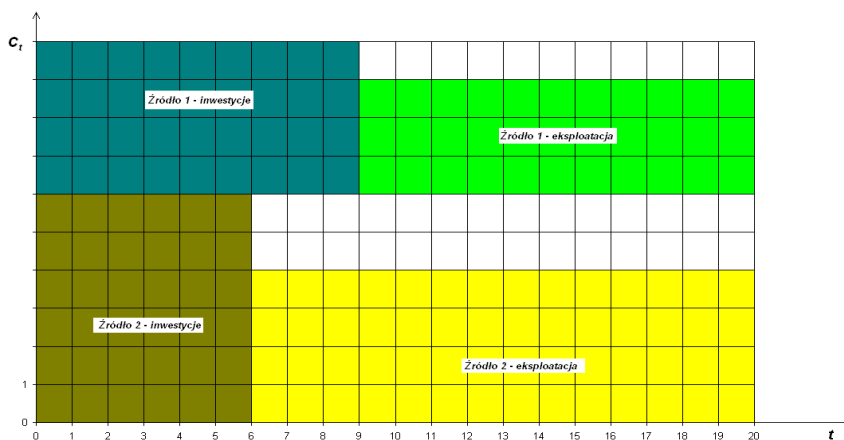


Rys. 5. Oszacowanie jakości otrzymanego rozwiązania.

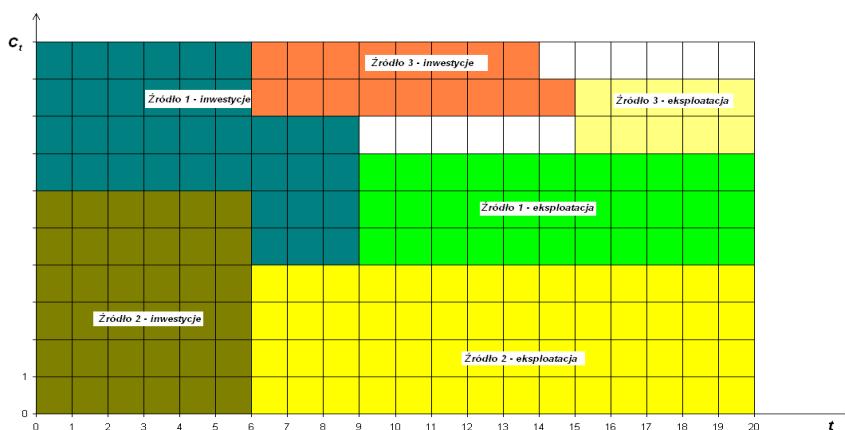
Opisana powyżej modyfikacja powoduje, że odchodzimy od „kanonicznego” programowania dynamicznego, gdzie kolejność rozpatrywania źródeł nie ma znaczenia. Eksperymenty obliczeniowe potwierdziły, że przy różnej kolejności rozpatrywania źródeł otrzymujemy różne rozwiązania. Trudno jest jednak podać, według 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).

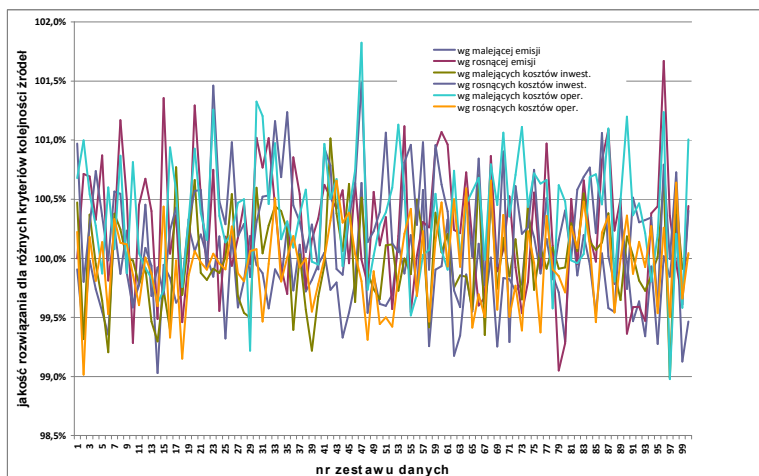


Rys. 6. Możliwy rozkład czasowy kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych dla dwóch przykładowych źródeł – metoda podstawowa

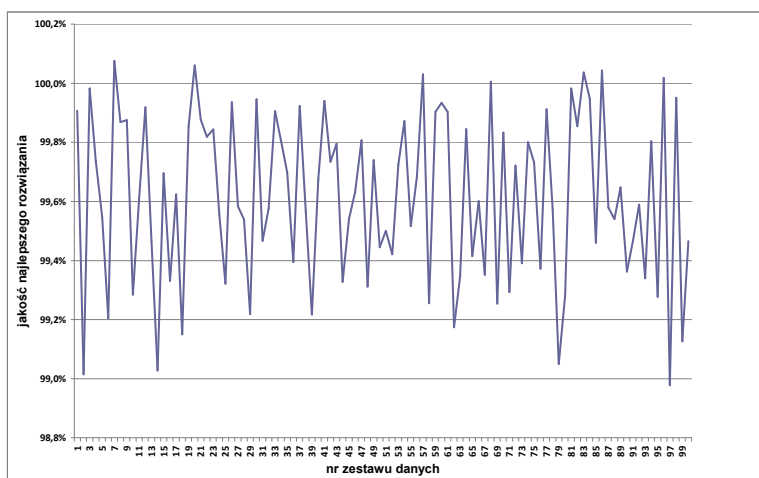


Rys. 7. Rozkład czasowy kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych dla trzech przykładowych źródeł – metoda udoskonalona

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 sześciu 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 niewielka poprawa, ale trzeba pamiętać, że w przypadku redukcji emisji CO₂ chodzi o ogromne sumy i nawet minimalna poprawa rozwiązania ma znaczenie.

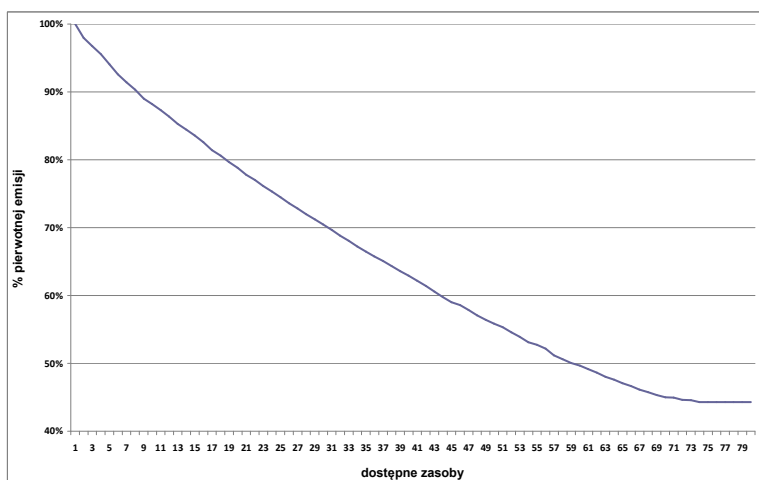


Rys. 8. Porównanie jakości rozwiązań dla sześciu reguł tworzenia listy źródeł



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

Opisaną wcześniej metodę można łatwo zastosować do inaczej sformułowanego zadania – jak wyliczyć minimalne koszty redukcji emisji CO₂, by osiągnąć pożądaną redukcję emisji, np. o 20%. Można to wykonać przez powtórzenie obliczeń dla wielu poziomów ograniczenia zasobów i otrzymania krzywej, jak pokazano to na rys. 10, który przedstawia zależność pożądanego poziomu redukcji emisji od nakładów na redukcję emisji.



Rys. 10. Poziom redukcji emisji CO₂ w zależności od nakładów.

4. 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 na zadaniach testowych można stwierdzić, że opisana metoda rozdziału środków na technologie redukcji emisji jest skuteczna. Następnym krokiem badań będzie jej sprawdzenie na praktycznych danych z polskiego sektora energetyki zawodowej. W przypadku redukcji emisji CO₂ 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 CO₂, 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 międzynarodowy-

mi. W przypadku redukcji emisji tlenków siarki konieczne jest przeformułowanie zadania, tak jak to pokazano w pracy Kałuszko (2009).

Literatura

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