



POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

**BADANIA OPERACYJNE I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE,
PRZESTRZEŃ, OPTIMALIZACJA**

**Olgierd Hryniewicz,
Andrzej Straszak,
Jan Studziński
red.**



**BADANIA OPERACYJNE
I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE, PRZE-
STRZEŃ, OPTIMALIZACJA**

INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH • POLSKA AKADEMIA NAUK

Seria: BADANIA SYSTEMOWE
tom 63

Redaktor naukowy:

Prof. dr hab. inż. Jakub Gutenbaum

Warszawa 2008

Olgierd Hryniewicz, Andrzej Straszak, Jan Studziński

**BADANIA OPERACYJNE I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE, PRZESTRZEŃ,
OPTYMALIZACJA**

Publikacja była opiniowana do druku przez zespół recenzentów, którego skład podano w treści tomu

Opinie, wyrażone przez autorów w pracach, zawartych w niniejszym tomie, nie są oficjalnymi opiniami Instytutu Badań Systemowych PAN, ani Polskiego Towarzystwa Badań Operacyjnych i Systemowych.

Copyright © by Instytut Badań Systemowych PAN & Polskie Towarzystwo Badań Operacyjnych i Systemowych
Warszawa 2008

ISBN 83-894-7519-7
EAN 9788389475190

Redakcja i opracowanie techniczne: Jan W. Owskiński, Aneta M. Pielak, Anna Gostyńska

**Lista recenzentów
artykułów, wchodzących w skład tomów serii „Badania Systemowe”
związanych z konferencją BOS 2008**

Dr Paweł Bartoszczuk
Dr inż. Lucyna Bogdan
Dr hab. inż. Zbigniew Buchalski
Mgr inż. Hanna Bury
Prof. dr hab. Marian Chudy
Dr Jan Gadomski
Mgr Grażyna Grabowska
Mgr inż. Andrzej Jakubowski
Dr hab. inż. Ignacy Kaliszewski
Dr Andrzej Kałużko
Dr hab. Leszek Klukowski
Dr hab. inż. Wiesław Krajewski
Dr inż. Lech Kruś
Dr hab. inż. Marek Libura
Dr Barbara Mażbic-Kulma
Dr inż. Edward Michalewski
Dr inż. Jan W. Owiński
Dr inż. Grażyna Petriczek
Dr inż. Henryk Potrzebowski
Dr Maciej Romaniuk
Prof. dr hab. Piotr Sienkiewicz
Dr hab. Henryk Spustek
Prof. dr hab. Andrzej Straszak
Dr hab. inż. Jan Studziński
Prof. dr hab. Tomasz Szapiro
Mgr Anna Szediw
Dr inż. Grażyna Szkatuła
Dr hab. inż. Tadeusz Witkowski
Dr Irena Woroniecka-Leciejewicz
Dr hab. Sławomir Zadrozny
Dr inż. Andrzej Ziółkowski

**Komitety Konferencji
Badania Operacyjne i Systemowe 2008
Rembertów, Akademia Obrony Narodowej**

Patronat honorowy

Bogdan Klich, Minister Obrony Narodowej
Maciej Nowicki, Minister Środowiska i Zasobów Naturalnych

Komitet Sterujący

Janusz Kacprzyk, Prezes Polskiego Towarzystwa Badań Operacyjnych i Systemowych
Olgięrd Hryniewicz, Dyrektor Instytutu Badań Systemowych
Janusz Kręcikij, Komendant Akademii Obrony Narodowej

Komitet Programowy

Piotr Sienkiewicz, *Przewodniczący*
Jacek Mercik, *Wiceprzewodniczący*

<i>Tomasz Ambroziak</i>	<i>Ryszard Budziński</i>	<i>Wojciech Cellary</i>
<i>Marian Chudy</i>	<i>Ludostaw Drelichowski</i>	<i>Jerzy Hołubiec</i>
<i>Olgięrd Hryniewicz</i>	<i>Adam A. Janiak</i>	<i>Jerzy Józefczyk</i>
<i>Ignacy Kaliszewski</i>	<i>Józef Korbicz</i>	<i>Maciej Krawczak</i>
<i>Piotr Kulczycki</i>	<i>Małgorzata Łatuszyńska</i>	<i>Marek J. Malarski</i>
<i>Barbara Mażbic-Kulma</i>	<i>Zbigniew Nahorski</i>	<i>Andrzej Najgebauer</i>
<i>Włodzimierz Ogryczak</i>	<i>Wojciech Olejniczak</i>	<i>Jan W. Owsiański</i>
<i>Andrzej Piegat</i>	<i>Krzysztof Santarek</i>	<i>Roman Słowiński</i>
<i>Honorata Sosnowska</i>	<i>Henryk Spustek</i>	<i>Jan Stachowicz</i>
<i>Andrzej Straszak</i>	<i>Tomasz Szapiro</i>	<i>Andrzej Szymonik</i>
<i>Ryszard Tadeusiewicz</i>	<i>Eugeniusz Toczyłowski</i>	<i>Tadeusz Trzaskalik</i>
<i>Jan Węglarz</i>	<i>Tadeusz Witkowski</i>	<i>Stanisław Zajas</i>
	<i>Bogdan Zdrowski</i>	

Komitet Organizacyjny

Jan W. Owsiański, Andrzej Kałusko, Mieczysław Pelc, Zbigniew Piątek

Sekretariat

Krystyna Warzywoda, Monika Majkut, Aneta M. Pielak, Krzysztof Sep,
Anna Stachowiak, Halina Świeboda, Tadeusz Winiarski

Redakcja wydawnictw

Janusz Kacprzyk, Piotr Sienkiewicz, Andrzej Najgebauer,
Olgięrd Hryniewicz, Andrzej Straszak, Jan Studziński,
Jan W. Owsiański, Zbigniew Nahorski, Tomasz Szapiro

Środowisko i jego ochrona

WSPOMAGANIE OPRACOWANIA STRATEGII REDUKCJI EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH

Andrzej Kaluszko

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

Praca opisuje problem opracowania długoterminowej polityki redukcji zanieczyszczeń gazowych w przypadku, gdy dostępne środki na redukcję są ograniczone. Zadanie polega na takim rozdziale środków, by osiągnięty efekt, w postaci redukcji emisji był maksymalny w zadanym czasie. Redukcja emisji w źródle następuje przez wprowadzenie do tego źródła jednej z dostępnych technologii redukcji emisji, charakteryzujących się kosztami inwestycyjnymi i kosztami operacyjnymi (eksploatacyjnymi). Do rozwiązania zadania zaproponowano metodę programowania dynamicznego.

1. Wstęp

W pracy rozpatruje się problem stworzenia efektywnej strategii redukcji emisji dla zbioru zakładów produkcyjnych (źródeł), emitujących zanieczyszczenia gazowe. Każdy z zakładów jest scharakteryzowany przez wielkość produkcji i wielkość emisji zanieczyszczeń do atmosfery. Wprowadzamy następujące oznaczenia:

N – liczba rozpatrywanych zakładów,

P_i – wielkość produkcji i -tego zakładu, $i = 1, 2, \dots, N$,

E_i – wielkość emisji zanieczyszczeń i -tego zakładu.

Produkcja P_i i emisja E_i są powiązane przez współczynnik A_i w następujący sposób:

$$E_i = A_i * P_i \quad (1)$$

Wielkość emisji ze źródła nie jest związana wyłącznie z wielkością produkcji, ale także z jej charakterem. Emisja w każdym źródle może zostać zmniejszona przez zastosowanie jednej z M technologii redukcji emisji. Dla uproszczenia wywodu, brak zmian uznajemy za jedną z technologii („nic nie rób”). Do zakładu można wprowadzić tylko jedną technologię, co jest związane z ponoszeniem kosztów inwestycyjnych i kosztów operacyjnych (eksploatacyjnych). Wprowadzamy następujące oznaczenia jednostkowych (liczonych na jednostkę produkcji) kosztów związanych z zastosowaniem technologii j w zakładzie i :

f_{ij}^1 - koszty inwestycyjne,

f_{ij}^2 - koszty operacyjne.

Koszty inwestycyjne dla źródła i i technologii j są opisane przez $P_i \cdot f_{ij}^1$, a koszty operacyjne przez $P_i \cdot f_{ij}^2$.

Każda technologia redukcji emisji jest scharakteryzowana przez jej efektywność e_j , tj. stopień w jakim redukuje emisję. Zakładamy, że efektywność każdej dostępnej technologii jest jednakowa dla każdego zakładu, w którym jest stosowana. Można zatem napisać:

$$E_i^j = E_i^0 \cdot (1 - e_j) \quad (2)$$

lub

$$E_i^j = P_i \cdot A_i \cdot (1 - e_j) \quad (3)$$

gdzie E_i^0 jest wielkością początkowej emisji ze źródła i (bez redukcji emisji), E_i^j jest wielkością emisji ze źródła i po wprowadzeniu technologii j redukcji emisji.

2. Opis zadania

Rozważmy następujące zadanie. W zadanym okresie T , złożonym z pewnej liczby jednakowych przedziałów (np. rocznych) mamy do dyspozycji fundusze przeznaczone na redukcję emisji w rozpatrywanych N źródłach. Fundusze mają tę samą wartość w każdym przedziale i są przeznaczone na pokrycie kosztów inwestycyjnych i operacyjnych wprowadzenia technologii redukcji emisji w źródłach. Stosujemy następujące oznaczenia:

$t = 1, 2, \dots, T$ – numer przedziału czasowego,

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

Zadanie polega na takim rozdysponowaniu dostępnych funduszy, tzn. przydziale technologii redukcji do źródeł emisji, by sumaryczna emisja z N źródeł w okresie T była maksymalnie zredukowana.

W dalszym ciągu wprowadzimy dwie zmienne binarne, zdefiniowane 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.

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

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

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

Na podstawie definicji, zmienne x_{ijt} i y_{ijt} muszą spełniać ograniczenie

$$x_{ijt} + y_{ijt} \leq 1, \text{ dla } i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M, t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

(nie jest możliwe jednoczesne inwestowanie i eksploatacja).

Wspomaganie opracowania strategii redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M y_{ijt} \cdot f_{ijt}^1 \cdot P_i \quad (5)$$

gdzie f_{ijt}^1 - część kosztów inwestycyjnych, związanych z wprowadzeniem technologii j do źródła i , przypadająca na przedział t .

Koszty inwestycyjne, związane technologią j w źródle i w przedziale t są dane przez wzór:

$$\sum_{j=1}^M y_{ijt} \cdot f_{ijt}^1 \cdot P_i \quad (6)$$

Koszty operacyjne technologii j dla źródła i w przedziale t są dane jako:

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

gdzie $f_{ijt}^2 = f_{ijt}^2$.

Koszty operacyjne dla wszystkich źródeł w przedziale t podaje wzór:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ijt} \cdot f_{ijt}^2 \cdot P_i \quad (8)$$

Koszty inwestycyjne dla wszystkich źródeł w przedziale t podaje wzór:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{ijt} \cdot f_{ijt}^1 \cdot P_i \quad (9)$$

Suma kosztów operacyjnych i kosztów inwestycyjnych dla wszystkich źródeł w przedziale t musi być nie większa od ograniczenia C_t .

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (x_{ijt} \cdot f_{ijt}^2 + y_{ijt} \cdot f_{ijt}^1) \cdot P_i \leq C_t \quad t=1, 2, \dots, T \quad (10)$$

Można teraz zapisać omawiane zadanie jako maksymalizację następującej funkcji F zmiennych x_{ijt} .

$$F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ijt} \cdot P_i \cdot A_i \cdot e_j \quad (11)$$

przy ograniczeniach (10).

3. Zastosowanie programowania dynamicznego

Opisane powyżej zadanie, nawet dla niewielkiej liczby źródeł i technologii, charakteryzuje się dużą liczbą zmiennych binarnych x_{ijt} i y_{ijt} oraz zmiennych ciąg-

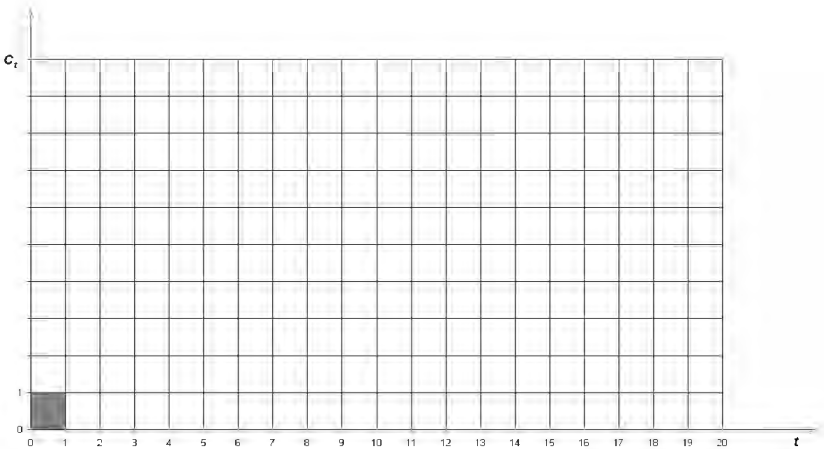
głych f_{ijt}^1 i dlatego jego analityczne rozwiązanie jest bardzo trudne. Pozostają metody przybliżone. W dalszym ciągu zostanie przedstawione zastosowanie programowania dynamicznego do rozwiązania postawionego zadania.

Na potrzeby zastosowania programowania dynamicznego dostępne zasoby dyskretyzujemy stosownie do użytego schematu. Dyskretyzacja zasobów względem osi czasu jest naturalna, ponieważ tak są zdefiniowane zasoby. Dyskretyzacja zasobów względem osi wartości jest arbitralna i dostosowana do możliwości obliczeniowych.

W dalszym ciągu proponujemy cztery możliwe schematy rozwiązania zadania przy użyciu programowania dynamicznego.

Schemat nr 1.

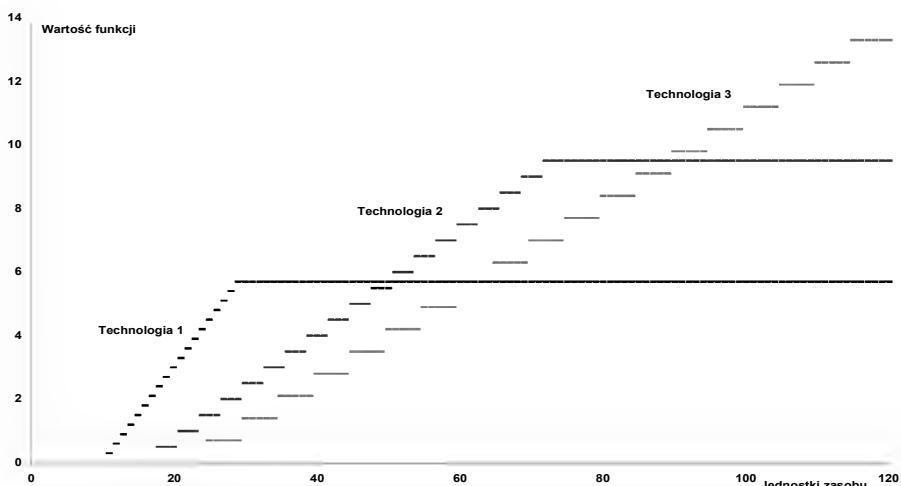
Zakładamy, że dysponujemy tylko jednym rodzajem zasobu, który może być przeznaczony zarówno na inwestycje jak i na eksploatację w dowolnym przedziale czasowym. Na Rys. 1 zaznaczono jednostkę tego zasobu.



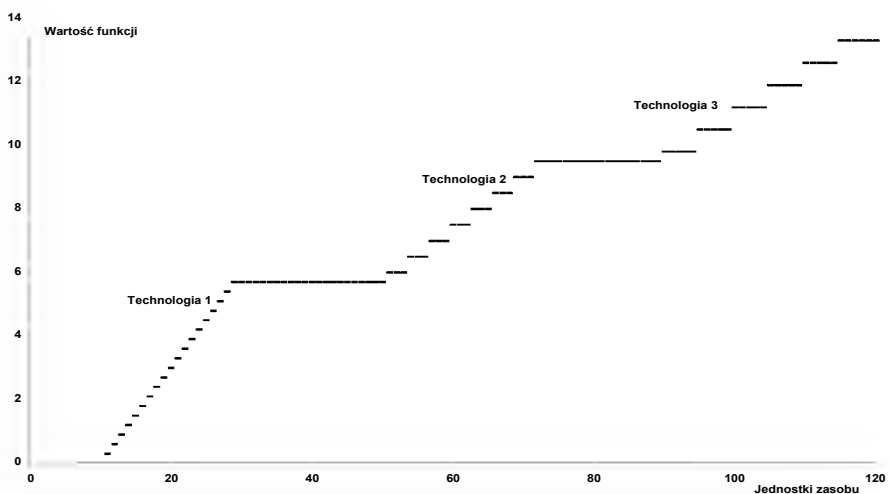
Rys. 1. Jednostka zasobu (zaciemnione pole) w schemacie nr 1.

Przy takim zdefiniowaniu zasobu mamy do czynienia z zadaniem programowania dynamicznego dla jednego rodzaju zasobu. Zgodnie ze schematem programowania dynamicznego w kolejnych krokach przydzielamy odpowiednie wielkości zasobu do kolejnych źródeł i wybieramy dla danego źródła najlepszą technologię dla danego poziomu zasobów.

Funkcja celu F może przyjąć dla zadanych liczby technologii i liczby przedziałów czasu ograniczoną liczbę wartości, zgodnie z tym, co pokazują Rys. 2 i 3. Eksploatacja technologii j w źródle i od przedziału t^* wymaga pokrycia kosztów inwestycji i eksploatacji w przedziale $[T - t^*]$.

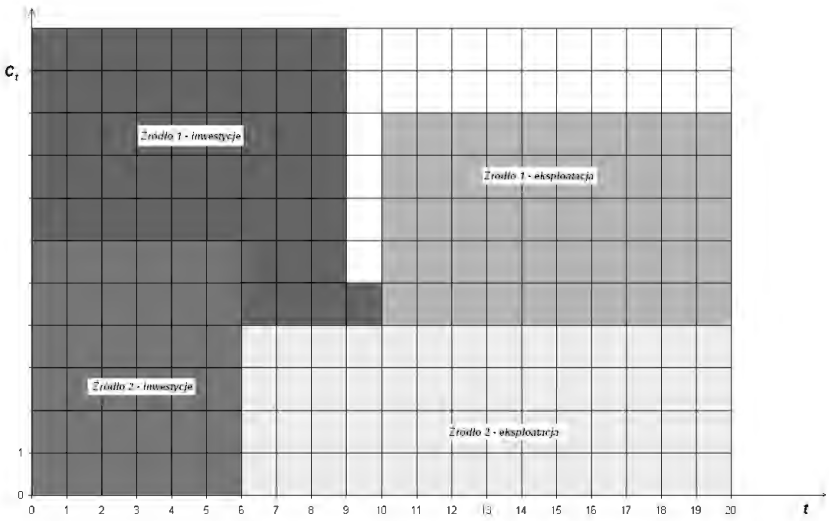


Rys. 2. Wykres zmienności funkcji F dla różnych technologii redukcji emisji.

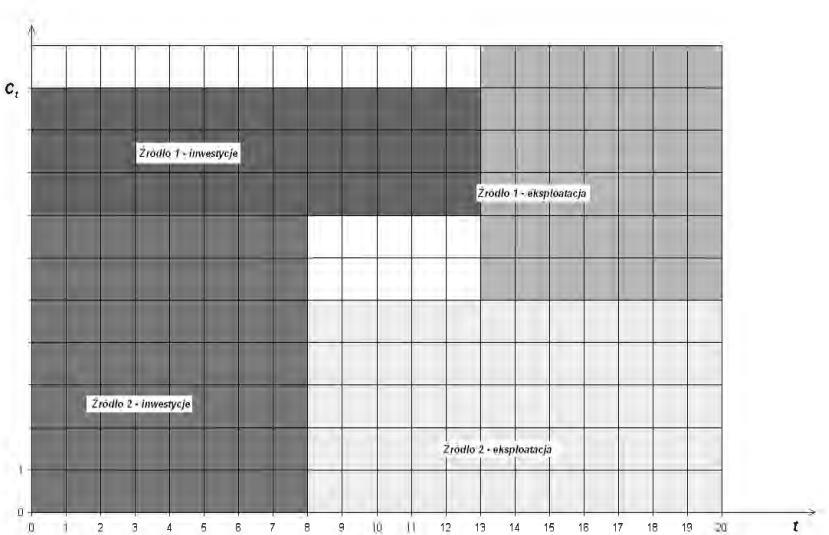


Rys. 3. Sumaryczny wykres zmienności funkcji F .

Wadą schematu nr 1 jest to, że uzyskane rozwiązanie może być niedopuszczalne z powodu przekroczenia ograniczenia zużycia zasobów w którymś z przedziałów: z powodu zbyt wysokich kosztów inwestycyjnych (Rys. 4) lub kosztów eksploatacyjnych (Rys. 5).



Rys. 4. Możliwy rozkład czasowy kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych – schemat nr 1.



Rys. 5. Możliwy rozkład czasowy kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych – schemat nr 1.

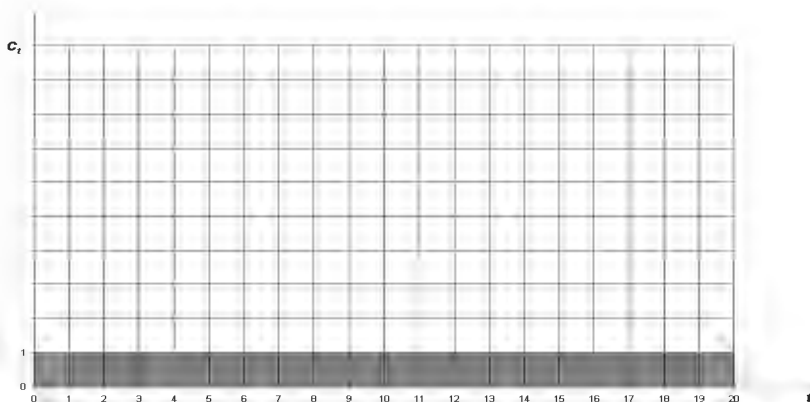
Schemat nr 2.

Zastosowanie tego schematu obliczeniowego może mieć miejsce w sytuacji, gdy schemat nr 1 da rozwiązanie takie jak pokazane na Rys. 5, gdzie koszty eksploatacyjne są zbyt wysokie. W tym przypadku zakładamy, że mamy dwa rodzaje zas-

bów: jeden zdefiniowany tak jak w schemacie nr 1, drugi związany z zasobami na eksploatację. Takie założenie powoduje, że rozwiązujemy zadanie programowania dynamicznego dla dwóch rodzajów zasobów, co znacznie powiększa złożoność obliczeniową schematu w porównaniu do schematu nr 1. Pozwala to jednak na uniknięcie takich rozwiązań, jak pokazane na Rys. 5. Schemat nr 2, podobnie jak schemat nr 1 nie gwarantuje uzyskania rozwiązania dopuszczalnego.

Schemat nr 3.

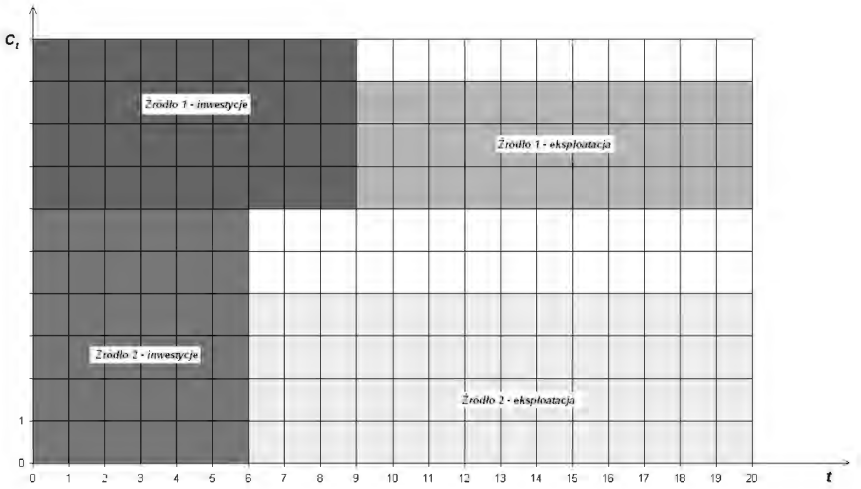
Zakładamy, że dysponujemy tylko jednym, nowym rodzajem zasobu, utworzonego sztucznie. Jest on zdefiniowany w ten sposób, że dotyczy jednakowej wartości zasobu pierwotnego dla całego rozpatrywanego okresu T . Na Rys. 6 zaznaczono jednostkę nowego zasobu.



Rys. 6. Jednostka zasobu (zaciemnione pola) w schemacie nr 3.

Przy takim zdefiniowaniu zasobu zadanie pierwotne jest sprowadzone do jednowymiarowego zadania programowania dynamicznego. Zgodnie z zasadą programowania dynamicznego, w kolejnych krokach przydzielamy odpowiednie wielkości zasobu do kolejnych zmiennych (w tym przypadku źródeł emisji). Po przydzieleniu zasobu do zmiennej wybieramy najkorzystniejszy (maksymalnie redukujący emisję z tego źródła) wariant inwestowania, tzn. technologię i moment rozpoczęcia jej działania.

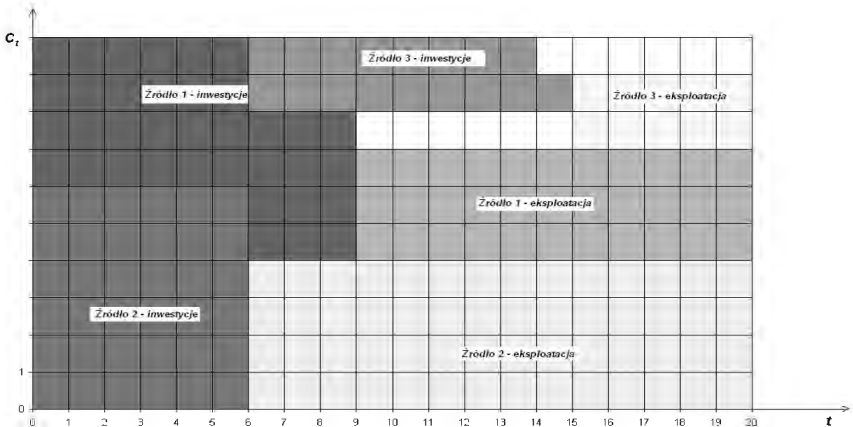
Wadą tego schematu jest to, że uzyskane rozwiązanie może być niskiej jakości z powodu niepełnego wykorzystania zasobów. Takie przykłady są pokazane na Rys. 7. Powodem tego jest sztywny przydział porcji zasobów do każdego ze źródeł osobno.



Rys. 7. Rozkład czasowy kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych dla dwóch przykładowych źródeł – schemat nr 3.

Schemat nr 4.

Schemat nr 4 jest ulepszoną wersją schematu nr 3, w którym odstępujemy od sztywnego rozdziału zasobów na źródła. 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 (Rys. 8). W schemacie nr 4 poprawa rozwiązania jest uzyskiwana kosztem wydłużenia czasu obliczeń.



Rys. 8. Rozkład czasowy kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych dla trzech przykładowych źródeł – schemat nr 4.

Numer schematu	Czy zawsze wyznacza rozwiązanie dopuszczalne?	Złożoność obliczeniowa
1	NIE	duża
2	NIE	bardzo duża
3	TAK	mała
4	TAK	średnia

Tabela 1. Porównanie schematów obliczeniowych.

W Tabeli 1 przedstawiono porównanie opisanych powyżej schematów obliczeniowych. Dwa ostatnie zapewniają uzyskanie rozwiązania dopuszczalnego, dwa pierwsze nie. Na podstawie charakterystyk czterech schematów obliczeniowych można zaproponować następującą procedurę obliczeniową. Obliczenia rozpoczynamy od schematu nr 1. W przypadku, gdy uzyskane rozwiązanie jest dopuszczalne, kończymy obliczenia. W przypadku przeciwnym stosujemy schemat nr 2. W przypadku uzyskania rozwiązania dopuszczalnego, kończymy obliczenia, podobnie jak przy poprzednim schemacie. Jeżeli otrzymane rozwiązanie nie jest dopuszczalne, traktujemy je jako oszacowanie rozwiązań wyliczonych przez schematy nr 3 i nr 4. W dalszym ciągu używamy schematu nr 3. W przypadku, gdy otrzymane rozwiązanie jest zadowalające, tzn. funkcja celu jest gorsza od oszacowania w stopniu przez nas akceptowanym, kończymy obliczenia. W przypadku otrzymania rozwiązania odbiegającego od wartości akceptowanej, posługujemy się schematem nr 4.

4. Przykład obliczeniowy

Liczba źródeł $N = 5$

Liczba technologii „niezerowych” $M = 3$, o efektywnościach 0.3, 0.5, 0.7

Horyzont czasowy $T = 20$

Ograniczenie zasobów $C_t = 10$ jednostek

Nr źródła	Emisja	Technologia 1		Technologia 2		Technologia 3	
		Koszty inwest.	Koszty operac.	Koszty inwest.	Koszty operac.	Koszty inwest.	Koszty operac.
1	1.0	10	1	15	3	20	5
2	1.2	10	2	20	4	30	6
3	0.8	20	1	30	4	50	6
4	1.3	5	2	10	5	15	6
5	0.9	15	3	20	4	30	5

Tabela 2. Dane o źródłach i technologiach.

Numer schematu	Wartość funkcji	Rozwiązanie dopuszczalne?
1	25.77	NIE
3	20.63	TAK
4	23.20	TAK

Tabela 3. Porównanie wyników schematów obliczeniowych.

Opisana wcześniej metoda rozwiązania zadania została sprawdzona na przykładzie obliczeniowym opisanym powyżej. Schemat nr 1 daje rozwiązanie niedopuszczalne, co powoduje konieczność użycia schematu nr 3, który daje rozwiązanie dopuszczalne, ale dość niskiej jakości - gorsze o ok. 20% od rozwiązania nr 1. Poprawę przynosi zastosowanie schematu nr 4 - uzyskane rozwiązanie jest gorsze o ok. 10% od rozwiązania nr 1. Taki wynik oznacza, że metoda daje rozwiązanie dopuszczalne, o którym wiadomo, że jest gorsze od najlepszego co najwyżej o 10%.

Opisana metoda może znaleźć zastosowanie w przypadku poszukiwania rozwiązań dwóch ważnych zadań praktycznych: zadania redukcji koncentracji SO₂ w zadanym obszarze oraz zadania redukcji emisji CO₂. Obydwa zanieczyszczenia gazowe są w Polsce emitowane głównie przez wielkie zakłady energetyczne, które mają w tej chwili jednego właściciela – Skarb Państwa, co umożliwia wypracowanie jednolitej polityki wprowadzania nowych technologii do źródeł emisji.

Literatura

- Bellman R.E., Dreyfus S E. (1962) *Applied Dynamic Programming*. Princeton University Press.
- Kałuszko A., Holnicki P. (2005) Minimizing costs of emission reduction – a dynamic programming approach. W: *Applications of informatics in environment, engineering and medicine*, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa.
- Kałuszko A. (2006) *The optimal strategy of emission reduction – a dynamic formulation*. Albrecht Gnauck: Modellierung und Simulation von Ökosystemen, Shaker Verlag.
- Kałuszko A. (2007) Zastosowanie programowania dynamicznego do opracowania strategii redukcji emisji gazów. *STUDIA I MATERIAŁY Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą*, **10**, 10, 68-79.

IBS PAN *Konf.*

46003

Bibl. podręczna

**Olgierd Hryniewicz, Andrzej Straszak, Jan Studziński
red.**

**BADANIA OPERACYJNE I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE, PRZESTRZEŃ,
OPTYMALIZACJA**

Książka składa się z artykułów przedstawiających wyniki prac z dziedziny badań operacyjnych i systemowych, poświęconych środowisku naturalnemu i zarządzaniu nim, zwłaszcza w zakresie ochrony atmosfery, globalnego ocieplenia i walki z nim, jakości i zaopatrzenia w wodę. Tematyka ta jest rozszerzona o aspekty przestrzenne, regionalne i samorządowe, a także planowanie i funkcjonowanie infrastruktury. Tom zamykają prace metodyczne, dostarczające technik, będących podstawą prezentowanych zastosowań.

ISBN 83-894-7519-7

EAN 9788389475190

Instytut Badań Systemowych PAN
tel. (4822) 3810241 / 3810273 e-mail: biblioteka@ibspan.waw.pl