



POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

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

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



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

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,
OPTIMALIZACJA**

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 Zadrożny
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
Olgierd 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>Olgierd 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 Kałużko, 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,
Olgierd Hryniewicz, Andrzej Straszak, Jan Studziński,
Jan W. Owsiański, Zbigniew Nahorski, Tomasz Szapiro

Środowisko i jego ochrona

MODEL HANDLU POZWOLENIAMI NA EMISJĘ CO₂ Z UWZGLĘDNIENIEM CEN ZAKUPU

Jarosław Stańczak

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

Algorytmy ewolucyjne są bardzo uniwersalnym narzędziem optymalizacyjnym. W tej pracy użyto ich do symulacji i optymalizacji działania rynku handlu pozwoleniami na emisję CO₂, przez kraje, będące sygnatariuszami protokołu z Kioto. Opisano też nową, rozszerzoną metodę opisu działania tego rynku, w którym uwzględniono wpływ cen zakupu pozwoleń na decyzje kupna oraz możliwość negocjacji tych cen przez kontrahentów. Dodatkowo wprowadzono do modelu pewną ceną minimalną pozwolenia, która ma zapobiegać sytuacji w której cena pozwolenia, będąca pochodną kosztów redukcji emisji, może spaść do zera. A zgodnie z modelem tradycyjnym taka sytuacja może wystąpić w przypadku sprzedaży pozwoleń przez kraj, którego emisja jest poniżej limitu narzuconego przez protokół z Kioto.

1. Wprowadzenie

Występująca od wielu lat tendencja do ocieplania się klimatu skłoniła badaczy do zająć się tym tematem. Wielu badaczy obarcza winą za to zjawisko emisję gazów powstającą w wyniku spalania paliw kopalnych, a w szczególności emisję CO₂. W związku z tym postanowiono zmniejszać tę emisję, a jedną z przyjętych metod jest ograniczanie emisji przez przydzielenie limitów emisji krajom oraz ewentualny handel tymi emisjami, o ile niektóre kraje nie będą mogły wykorzystać swoich limitów, a inne będą chciały powiększyć emisję poza przyznany im limit. Alternatywą dla kupowania pozwoleń od innych krajów jest oczywiście ograniczanie własnej emisji przez wdrażanie nowocześniejszych technologii i użycia innych sposobów pozyskiwania energii niż spalanie paliw. Większość państw na ziemi zobowiązała się przestrzegać nałożonych limitów podpisując konwencję zwaną protokołem z Kioto.

W tej pracy rozpatrywany jest problem handlu pozwoleniami na emisję z uwzględnieniem negocjowanych cen zakupu/sprzedaży i ich wpływu na otrzymane rozwiązania. W tym celu skonstruowano nowy model takiego rynku, w którym uwzględniony jest wpływ cen zakupu pozwoleń na funkcję celu zadania, a przez to na decyzje o zakupie bądź nie pozwoleń. Do symulacji rynku pozwoleń zastosowano algorytm ewolucyjny (AE).

2. Opis problemu

Aby w pełni zrozumieć jak tego typu zobowiązania wpłyną na gospodarkę światową oraz jakimi prawami będzie się rządził taki rynek, badacze z różnych krajów starają się budować modele takiego rynku i znaleźć optymalne rozwiązania, pozwalające przewidzieć ceny pozwoleń, oraz koszty ograniczania emisji dla róż-

nych krajów (Bartoszczuk, 2007; Ermoliev i in., 2000). Istotną sprawą jest też zbudowanie modelu samego przeprowadzania transakcji oraz rozwiązanie wielu innych problemów, związanych np. z wiarygodnością raportowanych przez kraje poziomów emisji itp. (Bartoszczuk, 2004; Bartoszczuk i Horabik, 2007; Godal, 2000; Klaassen i in., 2001).

Standardowy model handlu pozwoleniami na emisję CO₂ nie określa cen, po której zachodzą same transakcje. Teoretyczne wartości cen są określane przez model, jako pochodne kosztów redukcji dla danego poziomu emisji, ale jednocześnie nie są one uwzględniane w stosowanej funkcji celu problemu, dzięki której staramy się znaleźć punkt cen równowagi i wynikające z niego koszty redukcji emisji oraz zakupu pozwoleń. W rozpatrywanych modelach nie ma też mowy o ewentualnym negocjowaniu cen lub dodatkowych kosztach zawarcia transakcji np. typu prowizji lub podobnych. Model ten zakłada właściwie przymus przeprowadzenia odpowiednich transakcji po cenach teoretycznych, w zasadzie nie wiadomo jakich, gdyż problem rozpatrywany jest statycznie jako bilans zakupów, a rozwiązanie optymalne znajduje się w punkcie równowagi cen (Ermoliev i in., 2000), czyli w punkcie przecięcia się krzywych kosztu redukcji emisji. Wobec czego znane są jedynie ceny końcowe, bez wnikania w to w jaki sposób rynek do nich doszedł. Takie postawienie problemu jest wobec tego dość odległe od realiów rzeczywistego rynku. W związku z tym opracowany został nieco bardziej skomplikowany model tego rynku, w którym uzupełniono brakujące elementy o możliwość negocjacji cen i wpływ rzeczywistych wartości cen, po których zawierane są transakcje, na postać otrzymywanych rozwiązań. Dodatkowo cały rynek rozpatrywany jest dynamicznie, jako szereg transakcji zachodzących w różnych chwilach czasowych, wobec czego dla każdej transakcji można policzyć wartości cen teoretycznych i na ich podstawie prowadzić negocjacje i ustalać cenę po której zachodzi transakcja.

3. Nowy model rynku

Idea handlu pozwoleniami opiera się na założeniu, że pewne kraje mają nadwyżkę niewykorzystanych pozwoleń na emisję. Mogą je wobec tego odsprzedać krajom, które chciałyby emitować więcej niż im na to pozwalają limity narzucone przez protokół z Kioto.

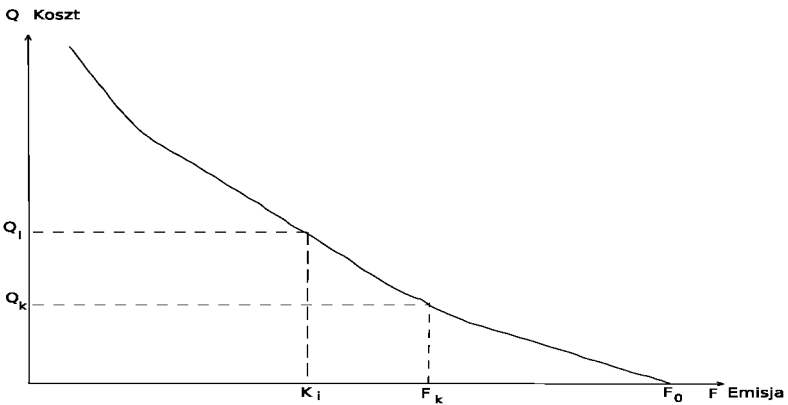
Sytuacja taka jest opłacalna wtedy, jeśli cena sprzedawanych pozwoleń na emisję będzie niższa niż cena redukcji emisji w danym kraju. Może się zdarzyć, że krajowi sprzedającemu będzie się opłacało jednocześnie redukować emisję własnymi środkami, jeśli koszt redukcji jest niższy niż możliwa do uzyskania cena za pozwolenia, a uzyskane w ten sposób niewykorzystane pozwolenia sprzedawać. Sytuację tę ilustrują Rys. 1 i 2.

Standardowo ceny (tzw. shadow price) są definiowane jako pochodne kosztów w danym punkcie. Jednakże w rzeczywistym świecie najczęściej nie są dokładnie znane koszty redukcji i funkcje według których się one zmieniają. Poza tym nawet gdyby te wartości były znane dokładnie, to również nie mogłyby być dokładnie przyjmowane jako jedyny składnik ceny pozwolenia. Na cenę kupowanego do-

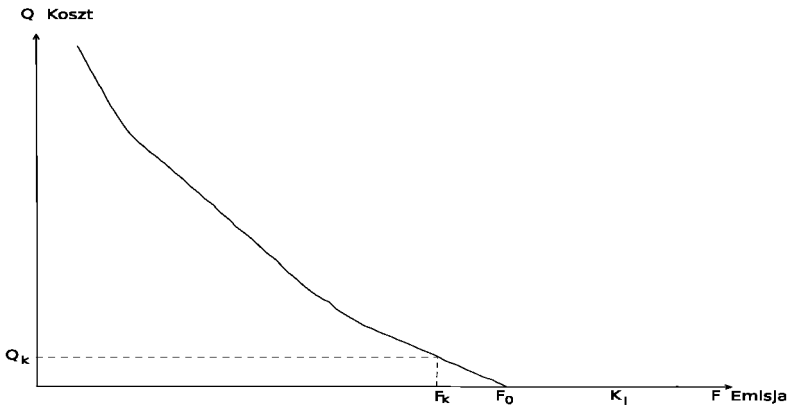
Model handlu pozwoleniami na emisję CO₂ z uwzględnieniem cen zakupu

bra wpływ ma najczęściej dużo więcej czynników natury ekonomicznej, politycznej i innych. Dlatego też w opisywanym rozwiązaniu przyjęto założenie według którego transakcja dochodzi do skutku, jeśli wynegocjowana cena pozwolenia jest niższa od jednostkowego kosztu redukcji strony kupującej, a wyższa od jednostkowego kosztu redukcji strony sprzedającej. Oczywiście dość trudno jest zamodelować sam proces negocjacji, dlatego też cena transakcji jest losowana z odpowiedniego przedziału cenowego, z maksimum prawdopodobieństwa wylosowania ceny średniej.

Rys. 1. Koszty redukcji emisji CO₂ bez handlu (Q_i) oraz z handlem (Q_k) dla kraju kupującego, K_i – ograniczenie emisji wynikające z protokołu w Kioto, F_k – emisja uzyskana przy założeniu handlu, F_0 – emisja początkowa



Rys. 2. Koszty redukcji emisji CO₂ bez handlu wynoszą 0 oraz z handlem (Q_k) dla kraju sprzedającego, K_i – ograniczenie emisji wynikające z protokołu w Kioto, F_k – emisja uzyskana przy założeniu handlu, F_0 – emisja początkowa



W zaproponowanym modelu dokonano pewnych istotnych zmian w stosunku do wersji podstawowej (w opisywanym modelu nie są brane pod uwagę niepewności emisji). Najistotniejszą jest zmiana funkcji celu. W modelu tradycyjnym funkcja celu wygląda następująco:

$$F = \min_{x_i} \sum_{i=1}^n c_i(x_i) \quad (1)$$

przy ograniczeniach: $x_i \leq K_i + y_i$ (2)

gdzie $c_i(x_i)$ – koszty redukcji emisji do wartości x_i dla kraju i , y_i – liczba zakupionych zezwoleń, K_i – limit na emisję wynikający z protokołu podpisanego w Kioto, x_i – bieżąca emisja.

Czyli minimalizujemy koszty redukcji emisji do założonego poziomu, pamiętając o tym, żeby nie przekroczyć limitu narzuconego przez protokół z Kioto, ewentualnie powiększonego o liczbę zakupionych pozwoleń na emisję.

W nowym modelu funkcja celu ma postać:

$$G = \max_{s_{ji}, \pi_{ji}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^T \left(c_{j-1,i}(x_{j-1,i}) - (c_{j,i}(x_{j,i}) - s_{ji} * \pi_{ji}) \right) \quad (3)$$

przy ograniczeniach: $x_{ji} \leq K_i + y_{ji}$ (4)

gdzie T – liczba przeprowadzonych transakcji kupna-sprzedaży pozwoleń, $c_{ji}(x_{ji})$ – koszty redukcji emisji do wartości x_{ji} po j transakcjach, y_{ji} – liczba zakupionych/sprzedanych zezwoleń po j transakcjach, K_i – limit na emisję wynikający z protokołu podpisanego w Kioto, x_{ji} – bieżąca emisja, s_{ji} – liczba sprzedanych/kupionych transakcji przez kraj i w transakcji j , π_{ji} – cena po jakiej sprzedano/kupiono pozwolenia.

Czyli występuje w nim maksymalizacja różnicy, między tym, co byłoby wydane na redukcję emisji bez handlu pozwoleniami, a tym co wydawane jest z uwzględnieniem handlu po każdej transakcji, czyli optymalizacja przeprowadzana jest na potrzeby każdej transakcji. Umożliwia to uwzględnienie w rozliczeniach kosztu zakupu i sprzedaży pozwoleń ich ceny która ma znaczny wpływ na opłacalność transakcji i decyzyję, czy warto kupić/sprzedać, czy też warto inwestować własne środki na ograniczenie emisji.

Dzięki nowej funkcji celu staramy się znaleźć rozwiązanie maksymalizujące różnicę pomiędzy kosztami bez handlu a kosztami z handlem pozwoleniami, czyli innymi słowy staramy się zmaksymalizować zysk na handlu pozwoleniami. W poprzedniej funkcji celu minimalizowano koszty redukcji emisji, bez jakiegokolwiek uwzględniania cen zakupu i sum przeznaczanych na ten cel, a koszty te mogą być znaczne i porównywalne z tymi, które wydawane są na samodzielłą redukcję CO₂.

Model zakłada również nieco zmodyfikowaną metodę ustalania cen pozwoleń. Modyfikacja polega na tym, że ustala się pewną cenę minimalną, poniżej której cena pozwolenia nie spada. Przeciwdziała to sytuacji, w której kraj mający emisję

poniżej wartości ustalonej protokołem z Kioto ma, według modelu tradycyjnego, zerowe ceny kosztów redukcji emisji i w zasadzie, zgodnie z poprzednim modelem, powinien pozwolenia rozdawać za darmo (taka sytuacja ma miejsce w testowanych przykładach dla krajów byłego ZSRR, ilustruje to Rys. 2). Wobec tego cena (tzw. shadow price) nie jest prostą pochodną kosztu redukcji, ale pochodną z pewną wartością minimalną. Właściwa cena, po jakiej następuje zakup pozwolenia, oraz ich liczba, podlegają negocjacjom i właściwie nie mogą być znane przed komputerową symulacją działania rynku, dlatego też w przedstawianych dalej wynikach symulacji komputerowych liczba sprzedawanych pozwoleń jest losowana z pewnego przedziału wartości. Podobnie cena pozwoleń jest losowana jako wartość z przedziału pomiędzy ceną maksymalną (shadow price) kupującego a ceną minimalną (zmodyfikowaną shadow price) sprzedającego, wykorzystany do tego celu jest odpowiednio zmodyfikowany rozkład normalny, z wartością oczekiwaną równą średniej cen teoretycznych kontrahentów.

4. Algorytm ewolucyjny użyty w symulacjach komputerowych

Do rozwiązania problemu użyto specjalizowanego algorytmu ewolucyjnego z odpowiednim zakodowaniem problemu i zestawem operatorów. Pojedynczy osobnik zawiera informacje o wszystkich krajach biorących udział w rynku, jest więc kompletnym rozwiązaniem problemu. Stosuje się też podejście, w którym każdy kraj jest oddzielnym osobnikiem (Alkemade i in., 2006; Clemens i Riechmann, 2006), lecz wtedy otrzymujemy jako wynik symulacji tylko jedno rozwiązanie, a wielkość populacji jest ograniczona do liczby krajów biorących udział w handlu. Jest to niekorzystne z uwagi na wyeliminowanie zrównoleglenia obliczeń, czyli głównej zalety obliczeń ewolucyjnych, gdzie najczęściej rozwiązania optymalnego poszukuje równoległe wiele osobników z populacji, a nie tylko jeden zestaw. Dlatego też takie podejście do obliczeń ewolucyjnych nie było tu używane.

W związku z przyjętą reprezentacją problemu cała populacja osobników zawiera wobec tyle rozwiązań problemu, ile jest w niej osobników, rozwiązania te nie muszą być jednak różne. Informacje opisujące pojedynczy kraj w rozwiązaniu to:

- cena teoretyczna własnego pozwolenia (shadow price);
- rzeczywista cena aktualnie sprzedanego/kupionego pozwolenia;
- wartość zakupionych i sprzedanych pozwoleń;
- liczba aktualnie zakupionych/sprzedanych pozwoleń;
- sumaryczna liczba zakupionych/sprzedanych pozwoleń;
- emisja bieżąca;
- emisja poprzednia (przed bieżącą transakcją);
- wartość bieżącej i poprzedniej funkcji celu.

Są one zawarte w każdym osobniku jako odpowiednio liczby całkowite lub zmiennoprzecinkowe. Do modyfikacji rozwiązań służą następujące dedykowane do problemu operatory genetyczne:

- konkurs – wylosowany kraj wystawia pewną liczbę pozwoleń na sprzedaż, a pozostałe kraje składają oferty kupna, wybierana jest najlepsza i tak dochodzi do modyfikacji rozwiązania;
- sprzedaż – wylosowane kraje przeprowadzają między sobą transakcje bilateralne, wymieniając warunki transakcji, jeśli są one opłacalne dla obu stron, transakcja jest wykonywana.

Z tym, że właściwe zmienne sterujące problemem to liczba aktualnie zakupionych/sprzedanych pozwoleń i wynegocjowana cena transakcji, pozostałe zapamiętane w osobniku dane są potrzebne do przeprowadzenia bilansu środków i wyliczenia funkcji celu.

Ceny transakcji i liczby pozwoleń są losowane. Dla liczby pozwoleń jest to liczba naturalna z zakresu $\{1, \dots, 5\}$, cena pozwolenia jest zaś losowana jako wartość pomiędzy ceną oferty kupna, a oferty sprzedaży.

Symulacja rynku przy pomocy algorytmu ewolucyjnego przeprowadzana jest etapami, tj. pozwolenia sprzedawane są w niewielkich pakietach, po negocjowanej cenie, dlatego też zawsze można dokładnie poznać cenę, po której zakupiono pozwolenia. Umożliwia to prowadzenie dokładnego bilansu wydatków/zysków i ich optymalizację działania w każdym kroku.

5. Wyniki symulacji komputerowych

Symulacje komputerowe przeprowadzono na standardowym zestawie danych, pochodzących m.in. z pracy Horabik (2005). Przedstawiają one dane dotyczące następujących grup krajów: USA, EU, Japonia, Kanada, kraje byłego ZSRR (WNP). Są to dane dość orientacyjne, m.in. zakładają obecność USA w rynku, choć USA nie podpisały na razie protokołu z Kioto. Jednak aby rynek zaczął praktycznie działać trudno jest pomijać kraj o najwyższej emisji CO₂. Stąd najczęściej bierze się pod uwagę w symulacjach hipotetyczną obecność USA na tym rynku. Natomiast faktyczny brak udziału USA w tym handlu powoduje, że rzeczywiste ceny pozwoleń utrzymują się na dużo niższym poziomie niż te z symulacji, gdyż jest zdecydowanie mniejszy popyt na pozwolenia niż gdyby USA uczestniczyły w rynku.

Zakłada się, że koszty zależą kwadratowo od wielkości redukcji emisji (5).

$$C = \begin{cases} a * (F_0 - F)^2 & \text{dla } F < F_0 \\ 0 & \text{dla } F \geq F_0 \end{cases} \quad (5)$$

gdzie a – parametr funkcji kosztu, F_0 – emisja początkowa, F – emisja bieżąca.

Natomiast koszty pozwoleń mają wartość pochodnej funkcji kosztu dla odpowiedniego poziomu emisji:

$$c = \begin{cases} 2 * a * (F_0 - F) & \text{dla } F < F_0 \\ \min & \text{dla } F \geq F_0 \end{cases} \quad (6)$$

Model handlu pozwoleniami na emisję CO₂ z uwzględnieniem cen zakupu

gdzie *min* – minimalna wartość ceny, wprowadzona dla urealnienia warunków wyceniania cen, a pozostałe symbole mają znaczenie takie samo jak we wzorze (5).

W Tabeli nr 1 zawarte są odpowiednie współczynniki do funkcji kosztów (5), mające również pewną interpretację fizyczną.

Tabela 1. Dane wykorzystane do obliczeń – współczynniki funkcji kosztów

Kraj	Emisja początkowa (F_0) MtC/rok	Parametr funkcji kosztu (a) MUSD/(MtC/rok) ²	Limit Kioto (K_i) MtC/rok
USA	1820,3	0,2755	1251
EU	1038,0	0,9065	860
Japonia	350,0	2,4665	258
Kanada	312,7	1,1080	215
WNP	898,6	0,7845	1314

W przypadku podejścia tradycyjnego (z założeniem idealnego rynku) otrzymujemy wynik przedstawiony w Tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki otrzymane przy założeniu rynku idealnego

Kraj	Emisja końcowa MtC/rok	Cena końcowa USD/tC	Liczba zak. pozwoleń Mt/rok	Koszt pozwoleń MUSD/rok	Koszt red. emisji MUSD/rok
USA	1562	143	310	11974,3	18523,7
EU	959	143	100	15790,6	5515,1
Japonia	321	143	63	29987,6	2074,3
Kanada	248	143	33	16077,6	4638,2
WNP	808	143	-506	-73830,3	6439,5

W przypadku zastosowania nowego modelu wynik symulacji nie jest już pojedynczym zestawem danych, ale może być zestawem scenariuszy, gdyż warunki jego otrzymania nie są deterministyczne. Wynika to nie tylko z losowego charakteru obliczeń ewolucyjnych (zestaw wyników dla zadania tradycyjnego również otrzymany był przy użyciu algorytmu ewolucyjnego, wobec czego mogą też być niewielkie różnice w rozwiązaniach dla wielu symulacji), ale i z zastosowanego modelu negocjacji w którym cena, po której zawierana jest transakcja, jest losowana z przedziału, w którym jest ona opłacalna dla kontrahentów. Ma to modelować wpływ negocjacji na cały proces handlu. Tak więc wyniki przedstawione zostaną w tabelach obrazujących największą i najmniejszą uzyskaną wartość funkcji celu obliczeń (dla 10 przeprowadzonych symulacji), czyli największy i najmniejszy zysk krajów biorących udział w handlu, w stosunku do sytuacji, gdyby tego handlu nie było.

Wyniki zamieszczone w Tabelach 2, 3, 4 pokazują, że jawne wprowadzenie ceny pozwolenia do modelu powoduje, że kupowane są w nieco mniejszych ilościach (4 kolumna Tabel 2 i 3) oraz, że nieco bardziej opłaca się inwestować we własne technologie redukcji emisji niż w zakup pozwoleń (6 kolumna Tabel 2 i 3).

Tabela 3. Wyniki otrzymane przy wykorzystaniu nowego modelu dla najmniejszego zysku z handlu pozwoleniami (90942,2MUSD/rok)

Kraj	Emisja końcowa MtC/rok	Cena końcowa USD/tC	Liczba zak. pozwoleń Mt/rok	Koszt pozwoleń MUSD/rok	Koszt red. emisji MUSD/rok
USA	1492,0	180,9	241	3966,9	29693,0
EU	959,0	143,2	99	1822,4	5657,5
Japonia	326,0	118,4	68	2105,4	1420,7
Kanada	264,0	108,0	49	777,9	2627,8
WNP	857,0	65,3	-457	-8672,6	1357,6

Tabela 4. Wyniki otrzymane przy wykorzystaniu nowego modelu dla największego zysku z handlu pozwoleniami (93580,5MUSD/rok)

Kraj	Emisja końcowa MtC/rok	Cena końcowa USD/tC	Liczba zak. pozwoleń Mt/rok	Koszt pozwoleń MUSD/rok	Koszt red. emisji MUSD/rok
USA	1470,0	193,0	219	3439,4	33806,6
EU	957,0	146,9	97	1410,3	5947,5
Japonia	334,0	78,92	76	301,9	631,4
Kanada	282,0	68,0	67	536,9	1044,3
WNP	855,0	68,4	-459	-5688,4	1491,3

Należy zauważyć, że w nowym modelu nie ma już końcowej ceny równowagi dla całego rynku, tak jak w podejściu tradycyjnym (Tabela 2, kolumna 3). Wynika to z tego, że ceny negocjowane są indywidualnie pomiędzy kontrahentami i zależą od ich warunków opłacalności przeprowadzenia transakcji oraz „umiejętności” negocjacyjnych, wobec czego nie powstaje punkt równowagi cen całego rynku, a jedynie bilateralne punkty równowagi, w których transakcje kupna sprzedaży pomiędzy dowolnymi stronami stają się już nieopłacalne i nie może dojść do żadnej nowej transakcji. Należy także pamiętać, że teoretyczna cena kosztów redukcji emisji jest jedynie jednym z czynników kosztu całej transakcji w nowym modelu rynku i wobec tego wartości zamieszczone w kolumnie 3 Tabeli 4 nie mogą być sobie równe w punkcie równowagi rynku.

Oczywiście sumaryczne koszty redukcji w metodzie 2 (40756,6 MUSD/rok – Tabela 2 lub 42921,1 MUSD/rok – Tabela 3) rosną w stosunku do kosztów metody 1 (37190,8 MUSD/rok), co jest zrozumiałe z uwagi na wprowadzenie wyższych kosztów zakupu pozwoleń. Natomiast analiza wyników zamieszczonych w Tabelach 3 i 4 umożliwia wnioskowanie na temat możliwych wahań kosztów pozwoleń w zależności od stanowiska i możliwości negocjatorów cen. Widoczne są możliwości poczynienia znacznych oszczędności przy umiejętnym negocjowaniu cen.

6. Podsumowanie

Algorytmy ewolucyjne są doskonałym narzędziem do analizy zjawisk ekonomicznych. Można, używając ich, wziąć pod uwagę pod uwagę znacznie więcej parametrów, niż przy użyciu typowych metod analizy, m.in. odchodząc od nierealistycznego założenia rynku idealnego w handlu pozwoleniami na emisję. Zbadanie

wpływu, zdecydowanie bliższym rzeczywistości, cen zakupu i ewentualne zasymulowanie wpływu negocjacji cen na koszty ich zakupu staje się dość łatwym zadaniem, dzięki użyciu specjalizowanego algorytmu ewolucyjnego i rozszerzonego modelu zjawiska zaproponowanego w tej pracy.

Literatura

- Alkemade F., La Poutre H. i Amman H.M. (2006) Robust Evolutionary Algorithm Design for Socio-economic Simulation. *Computational Economics*, 28, s. 355-470.
- Bartoszczuk P. (2004) Tradable emission permits as efficient strategy for achieving environmental goals. *Proceedings of The International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories: Verification, Compliance and Trading*, Warszawa, s. 143-150.
- Bartoszczuk P. i Horabik J. (2007) Tradable Permit Systems: Considering Uncertainty in Emission Estimates. *Water Air Soil Pollution: Focus*, 7, Springer Verlag, s. 573-579.
- Bartoszczuk P. (2007) Minimizing the Cost of Abatement under Imperfectly Observed Emissions, *Proceedings of 2nd International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories*, IIASA, Laxenburg, Austria, s. 1-8.
- Clemens C. i Riechmann T. (2006) Evolutionary Dynamics in Public Good Games. *Computational Economics*, 28, s. 399-420.
- Ermoliev Y., Michalevich M. i Nentjes A. (2000) Markets for Tradable Emission and Ambient Permits: A dynamic approach. *Environmental and Resource Economics*, 15, s. 39-56.
- Godal O. (2000) Simulating the Carbon Permit Market with Imperfect Observations of Emissions: Approaching Equilibrium through Sequential Bilateral Trade. Interim Report IR-00-060, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Horabik J. (2005) On the costs of reducing GHG emissions and its underlying uncertainties in the context of carbon trading. Raport Badawczy RB/34/2005, IBS PAN.
- Klaassen G., Nentjes A. i Smith M. (2001) Testing the dynamic theory of emissions trading: Experimentl evidence for global carbon trading. Interim Report IR-01-063, IIASA, Laxenburg, Austria.

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