83/2007

Raport Badawczy
Research Report

RB/34/2007

Model handlu pozwoleniami na emisję CO_2 z uwzględnieniem wpływu cen zakupu

J. Stańczak

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 Pracowni zgłaszający pracę:
prof. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski

Warszawa 2007

Model handlu pozwoleniami na emisję CO_2 z uwzględnieniem wpływu cen zakupu

Jarosław Stańczak
IBS PAN
01-447 Warszawa, ul Newelska 6
stanczak@ibspan.waw.pl

Wstęp

Występująca od wielu lat tendencja do ocieplania się klimatu skłoniła badaczy do zajęcia się tym tematem. Wielu badaczy obarcza winą za to zjawisko emisję gazów powstającą w wyniku spalania paliw kopalnych, a w szczególności emisję CO_2. 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 ją 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 Kyoto.

W tej pracy rozpatrywany jest problem handlu pozwoleniami na emisję z uwzględnieniem negocjowanych cen zakupu/sprzedaży i ich wpływu na otrzymane rozwiązania. Do symulacji rynku pozwoleń zastosowano algorytm ewolucyjny (AE).

Opis problemu

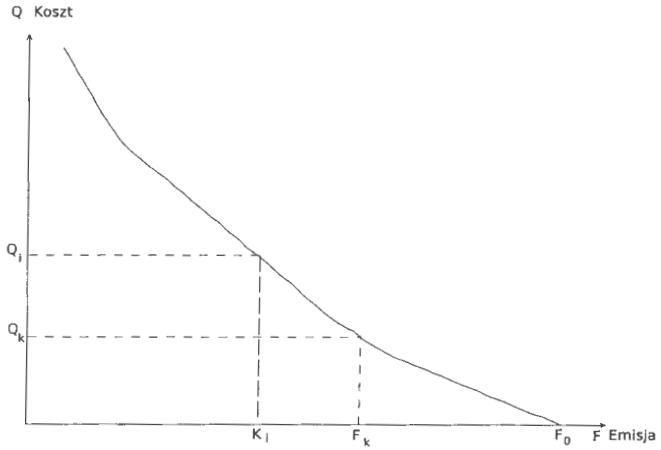
Aby w pełni zrozumieć jak tego typu zobowiązania wpłyną na gospodarkę światową oraz jakimi prawami będzie się rządził taki rynek, badacze z różnych krajów starają się budować

modele takiego rynku i znaleźć optymalne rozwiązania, pozwalające przewidzieć ceny pozwoleń, oraz koszty ograniczania redukcji dla różnych krajów [3]. Istotną sprawą jest też zbudowanie modelu samego przeprowadzania transakcji oraz rozwiązanie wielu innych problemów, związanych np. z wiarygodnością raportowanych przez kraje poziomów emisji itp. [4], [6].

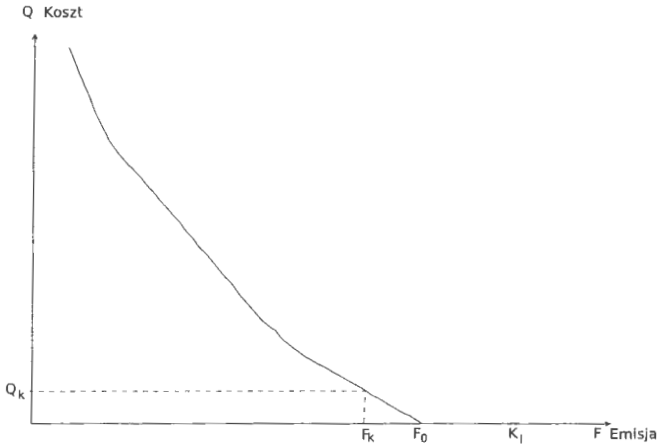
Standardowy model handlu pozwoleniami na emisję CO_2 nie określa cen, po której zachodzą same transakcje. Teoretyczne wartości cen są określane przez model, ale jednocześnie nie są one uwzględniane w stosowanej funkcji celu problemu, dzięki której staramy się znaleźć punkt cen równowagi i wynikające 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, a rozwiązanie optymalne znajduje się w punkcie równowagi cen [3]. 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.

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 Kyoto.



Rys. 1. Koszty redukcji emisji CO_2 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 CO_2 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.

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, a uzyskane w ten sposób niewykorzystane pozwolenia sprzedawać. Sytuację tę ilustrują rysunki 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 dobra wpływ ma najczęściej dużo więcej czynników. 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.

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:

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

przy ograniczeniach:

$$x_i \leq K_i + y_i \tag{2}$$

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 ty, żeby nie przekroczyć limitu narzuconego przez protokół z Kyoto, ewentualnie powiększonego o liczbę zakupionych pozwoleń na emisję.

W nowym modelu funkcja celu ma postać:

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

przy ograniczeniach:

$$x_{ji} \leq K_i + y_{ji} \tag{4}$$

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 decyzję, czy warto kupić/sprzedać, czy też warto inwestować własne środki na ograniczenie emisji.

Dzięki nowej funkcji celu staramy się znaleźć rozwiązanie, które maksymalizuje 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 samodzielną redukcję CO_2.

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 zerowe ceny kosztów (taka sytuacja ma miejsce w testowanych przykładach dla krajów byłego ZSRR). 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

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 [1], [2], lecz wtedy otrzymujemy z symulacji tylko jedno rozwiązanie, a wielkość populacji jest ograniczona do liczby krajów biorących udział w handlu. W związku z tym nie było ono 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 potrzebne do opisania pojedynczego kraju 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.

Natomiast do modyfikacji rozwiązań służą następujące 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 transakcję.

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

Wyniki symulacji komputerowych

Symulacje komputerowe przeprowadzono na standardowym zestawie danych, pochodzących m.in. z pracy [5]. Przedstawiają one dane dotyczące następujących grup krajów: USA, EU, Japonia, Kanada, kraje byłego ZSRR (WNP). Zakłada się, że koszty zależą kwadratowo od wielkości redukcji emisji (5).

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

gdzie:

a – parametr funkcji kosztu;

F_0 – emisja początkowa;

F – emisja bieżąca.

Tabela 1 zawiera odpowiednie współczynniki do funkcji kosztów, mające również odpowiednią interpretację fizyczną.

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

Tab. 1. Dane wykorzystane do obliczeń

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

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

Tab. 2. Wyniki otrzymane przy założeniu rynku idealnego

W przypadku zastosowania nowego modelu wynik symulacji jest przedstawiony w tabeli 2.

Kraj	**Emisja końcowa MtC/rok**	**Cena końcowa USD/tC**	**Liczba zak. pozwoleń Mt/rok**	**Koszt pozwoleń MUSD/rok**	**Koszt red. emisji MUSD/rok**
USA	1480,0	187,5	229	4290,6	31904,0
EU	959,0	143,2	99	1183,6	5657,5
Japonia	335,0	74,0	77	2337,2	555,0
Kanada	268,0	99,1	53	381,2	2213,9
WNP	856,0	66,8	-458	-8192,5	1423,7

Tab. 3. Wyniki otrzymane przy wykorzystaniu nowego modelu

Wyniki zamieszczone w tabelach pokazują, że jawne wprowadzenie ceny pozwolenia do modelu powoduje, że kupowane są w nieco mniejszych ilościach (4 kolumna w Tab. 2 i 3) oraz, że nieco bardziej opłaca się inwestować we własne technologie redukcji emisji niż w zakup pozwoleń (6 kolumna Tab. 2 i 3). Oczywiście sumaryczne koszty redukcji w metodzie 2 (41754 MUSD/rok) rosną w stosunku do kosztów metody 1 (37190.8 MUSD/rok), co jest zrozumiałe z uwagi na wprowadzenie wyższych kosztów zakupu pozwoleń.

Literatura

[1] F. Alkemade, H. La Poutre, H. M. Amman: *Robust Evolutionary Algorithm Design for Socio-economic Simulation*, Computational Economics (2006) 28, pp 355-470.

[2] C. Clemens, T. Riechmann: *Evolutionary Dynamics in Public Good Games*, Computational Economics (2006) 28, pp 399-420.

[3] Y. Ermoliev, M. Michalevich, A. Nentjes: *Markets for Tradable Emission and Ambient Permits: A dynamic approach*, Environmental and Resource Economics 15, 2000, pp 39-56.

[4] O. Godal: *Simulating the Carbon Permit Market with Imperfect Observations of Emissions: Approaching Equilibrium through Sequential Bilateral Trade*, Interim Report IR-00-060, IIASA, Laxenburg, Austria, 2000.

[5] J. Horabik: On the costs of reducing GHG emissions and its underlying uncertainties in the context of carbon trading, Raport Badawczy RB/34/2005, IBS PAN, 2005.

[6] G. Klaasen, A. Nentjes, M. Smith: *Testing the dynamic theory of emissions trading: Experimentl evidence for global carbon trading*, Interim Report IR-01-063, IIASA, Laxenburg, Austria, 2001.