

DWUKRYTERIALNA OCENA NASTĘPSTW POLITYKI OGRANICZENIA EMISJI CO₂ DLA ROZWOJU GOSPODARCZEGO POLSKI

Jan Gadomski, Lech Kruś

Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk
e-mail: jan.gadomski@ibspan.waw.pl, krus@ibspan.waw.pl

Streszczenie: Analizowane są skutki ograniczenia emisji CO₂ dla rozwoju gospodarczego Polski. Narzędziem analizy jest model składający się z czterech sektorów produkujących odpowiednio: energię, nieenergetyczne nakłady pośrednie, dobra konsumpcyjne, dobra inwestycyjne, jak również z sektorów konsumpcji oraz wymiany z zagranicą. W każdym z sektorów rozpatrywane są różne technologie ze względu na ich efektywność ekonomiczną oraz emisyjność. Uwzględniono handel pozwoleniami i handel zagraniczny. Optymalizacja uwzględnia dwa sprzeczne cele: maksymalizację konsumpcji oraz minimalizację emisji CO₂.

Słowa kluczowe: modelowanie ekonomiczne, konwersja technologii, optymalizacja, optymalizacja wielokryterialna, emisja gazów cieplarnianych

WPROWADZENIE

Celem pracy jest analiza procesu konwersji technologicznej w gospodarce polskiej będącej następstwem polityki ograniczenia emisji CO₂.

Zdecydowana większość analiz dotyczących gospodarki polskiej została opracowana przy użyciu modeli CGE, takich jak, na przykład, [Antoszewski 2015, Boratyński 2012]. Modele tego typu mają jednak słabe strony. W modelowaniu sektora wytwarzania energii przy użyciu modeli CGE nie jest uwzględniony fakt, że sektor ten jest daleki od modelu doskonałej konkurencji, zatem stosowanie neoklasycznych funkcji produkcji jest niewskazane, ponieważ nie przewidują one możliwości pracy w zakresie technicznej nieefektywności. Innym uproszczeniem stosowanym w modelach CGE jest założenie kontinuum technologii produkcji. W rzeczywistości liczba dostępnych technologii jest ograniczona, a ich

hybrydyzacja możliwa tylko w ograniczonym zakresie. Inny zarzut dotyczy ignorowania faktu, że zdolności produkcyjne są rzadko wykorzystywane w pełni.

Proponujemy inne podejście. Analiza wpływu polityki ograniczenia emisji CO₂ na rozwój gospodarczy Polski jest przeprowadzona za pomocą modelu, w którym nacisk położono na wybór technologii produkcji w wyróżnionych sektorach oraz na aspekt ilościowy. Model nie wskazuje na narzędzia realizacji celów, ogranicza się do wyznaczenia wielkości optymalnych. Rozwiązanie zagadnienia następuje przy użyciu optymalizacji dwukryterialnej. Model wykorzystany w tym badaniu jest rozwinięciem wcześniejszego modelu, patrz [Gadomski i in. 2015]. Po Wprowadzeniu przedstawia się opis opracowanego modelu, metodę analizy wielokryterialnej, wyniki symulacji i uwagi końcowe.

MODEL MAKROEKONOMICZNY

Przed transformacją gospodarka rozwija się przy ustalonej stopie inwestowania stosując tańsze, lecz brudniejsze technologie. Wprowadzenie limitów emisji, liczby pozwoleń na emisję oraz handel tymi pozwoleńiami wymusza zmianę stosowanych technologii. Założono, że wybór technologii produkcji rozpoczyna się w 2010 r. Związek między polityką ograniczania emisji CO₂ a rozwojem gospodarczym Polski jest modelowany za pomocą modelu makroekonomicznego, w którym wyróżniono cztery sektory produkcyjne. Uwzględniono ponadto jeden sektor konsumujący i jeden sektor wymiany z zagranicą odpowiadający za eksporty i importy sektorów produkcyjnych oraz obsługę długu zagranicznego/dochodów z aktywów zagranicznych, jak również handel pozwoleńiami na emisję CO₂. Przyjęto następującą konwencję oznaczeń. Litera *E*, *M*, *C* i *I* oznaczają odpowiednio sektory produkujące: *E* – energię zużywaną przez wszystkie sektory produkujące i sektor konsumujący oraz wymieniane z zagranicą, *M* – sektor produkujący materiały i surowce (poza energią) zużywane w sektorach produkcyjnych oraz wymieniane z zagranicą, *C* – sektor produkujący dobra (bez energii) konsumowane w sektorze konsumującym oraz wymieniane z zagranicą, *I* – sektor wytwarzający dobra inwestycyjne kupowane przez sektory produkcyjne dla zwiększenia zasobów środków trwałych, oraz wymieniane z zagranicą.

Poza sektorem *E*, który ma do wyboru trzy technologie, pozostałe sektory produkcyjne wybierają spośród dwóch technologii. Technologie sektora *E* są interpretowane w następujący sposób: pierwsza technologia to dotychczas stosowana najtańsza, ale najbrudniejsza; druga technologia to zmodernizowana stara technologia z ewentualnym uzupełnieniem o technologię nuklearną, oraz trzecia najczystsza, lecz najdroższa, oparta na odnawialnych źródłach energii.

Sektor konsumujący uzyskuje dochód brutto z funkcjonowania sektorów produkcyjnych, który powiększony/pomniejszony przez sprzedaż nadwyżki pozwoleń ponad emisję/zakup brakujących pozwoleń na emisję, oraz dochody z aktywów zagranicznych/koszty obsługi długu zagranicznego, tworzy dochód

dyspozycyjny. Ten ostatni generuje popyty konsumpcyjny i inwestycyjny. Popyt konsumpcyjny jest dzielony w ustalonych proporcjach na popyt na dobra konsumpcyjne (bez energii) oraz energię zużywane w sektorze konsumującym.

W każdym z sektorów E , M , C i I podaż jest równa popytowi, krajowe deficyty są pokrywane importem, a nadwyżki są przeznaczane na eksport. Przyjęto ceny stałe i stałą proporcję cen krajowych i zagranicznych.

W sektorach produkcyjnych o indeksie i , $i = M, E, C, I$; j -ta technologia produkcji, $j = 1, 2, 3$; jest opisana przez następujące parametry: γ_{ij} - produktywność kapitału; δ_{ij} - stopa deprecjacji środków trwałych; α_{ij} - zużycie dóbr wytwarzanych w sektorze M na jednostkę produkcji; β_{ij} - zużycie dóbr wytwarzanych w sektorze E na jednostkę produkcji; μ_{ij} - jednostkowa emisja CO₂ towarzysząca produkcji. Parametry te mogą przyjmować egzogenicznie ustalone zmienne wartości.

Zdolność produkcyjna Q_{ijt} w roku t , $t = t_0, \dots, T$; jest opisana za pomocą następującej zależności:

$$Q_{ijt} = \gamma_{ij} K_{ijt-1}; \quad (1)$$

gdzie: K_{ijt-1} - zasób kapitału związanego z j -tą technologią w i -tym sektorze pod koniec roku $t-1$; t_0 - rok początkowy okresu symulacji, przyjęto, że $t_0 = 2010$ r.; T - rok końcowy okresu symulacji, przyjęto, że $T = 2090$ r. Zależność (1) jest jednoczynnikową funkcją produkcji, co jest następstwem założenia, że w analizowanym okresie siła robocza występuje w obfitości.

Produkcja X_{ijt} wytworzona przy użyciu j -tej technologii w sektorze i -tym w roku t jest nie większa od zdolności produkcyjnych związanych z j -tą technologią w i -tym sektorze: $0 \leq X_{ijt} \leq Q_{ijt}$. Produkcja całkowita sektora i w roku t jest sumą produkcji uzyskanych przy użyciu dostępnych w tym sektorze technologii:

$$X_{it} = X_{i1t} + X_{i2t} + X_{i3t}. \quad (2)$$

Zasób środków trwałych (kapitału) pod koniec roku t jest powiększana przez poniesione w roku t inwestycje I_{ijt} w j -tą technologię w sektorze i -tym, oraz pomniejszany przez deprecjację $K_{ijt-1}\delta_{ij}$ środków trwałych:

$$K_{ijt} = K_{ijt-1}(1 - \delta_{ij}) + I_{ijt}, \quad (3)$$

Wytwarzaniu produkcji X_{ijt} w sektorze i -tym przy użyciu j -tej technologii towarzyszy emisja CO₂ w ilości S_{ijt} danej wzorem:

$$S_{ijt} = \mu_{ij} X_{ijt}. \quad (4)$$

Całkowita emisja CO₂ *i*-tego sektora S_{it} , oraz całkowita emisja kraju S_t w roku t są równe odpowiednio:

$$S_{it} = S_{i1t} + S_{i2t} + S_{i3t}, \quad S_t = S_{Et} + S_{Mt} + S_{ICt} + S_{It}. \quad (5)$$

Zależności od (1) do (5) opisują krajową podaż i związaną z nią emisję CO₂.

Popyt na produkcję sektora E jest kształtowany przez popyt produkcyjny wszystkich sektorów produkcyjnych, popyt na energię sektora konsumpcyjnego oraz saldo wymiany zagranicznej. Z równości podaży i popytu sektora E wynika następująca zależność:

$$X_{E1t} + X_{E2t} + X_{E3t} = \sum_{i=E,M,C,I} \sum_{j=1,2,3} \beta_{ij} X_{ijt} + \lambda \rho_t \cdot Y_t^d + WZ_{Et}, \quad (6)$$

gdzie: Y_t^d - dochód dyspozycyjny, zdefiniowany poniżej; $\rho_t \cdot Y_t^d$ - przeznaczona na konsumpcję część dochodu dyspozycyjnego, wielkość wynikowa; λ - stały współczynnik, $0 < \lambda < 1$, określający udział wydatków na energię w wydatkach sektora konsumującego; WZ_{Et} - saldo wymiany z zagranicą sektora E w roku t .

Popyt na produkcję sektora wytwarzającego dobra pośrednie (bez energii) M jest kształtowany przez popyt produkcyjny wszystkich sektorów i saldo wymiany zagranicznej. W związku z tym:

$$X_{M1t} + X_{M2t} = \sum_{i=E,M,C,I} \sum_{j=1,2,3} \alpha_{ij} X_{ijt} + WZ_{Mt}, \quad (7)$$

gdzie WZ_{Mt} oznacza saldo wymiany zagranicznej produktami sektora M w roku t .

Wytworzony dochód Y_t jest równy produkcji globalnej wszystkich sektorów pomniejszonej o wydatki materialne:

$$Y_t = \sum_{i=E,M,C,I} \sum_{j=1,2,3} [1 - (\alpha_{ij} + \beta_{ij})] X_{ijt}, \quad (8)$$

Dochód dyspozycyjny Y_t^d jest równy dochodowi Y_t powiększonemu o saldo handlu pozwoleniami na emisję oraz dochody z aktywów zagranicznych lub pomniejszone przez koszt obsługi długu zagranicznego:

$$Y_t^d = Y_t + P_t(N_t - S_t) + r \cdot D_{t-1}, \quad (9)$$

gdzie N_t - liczba pozwoleń na emisję w roku t , S_t - emisja całkowita w roku t , P_t - cena jednostki pozwoleń na emisję w roku t , niewykorzystane pozwolenia są sprzedawane gdy $N_t - S_t > 0$, a brakujące pozwolenia muszą zostać kupione, gdy $N_t - S_t \leq 0$; r - stopa procentowa, D_t - dług pod koniec roku t związany z wymianą z zagranicą wyrażający się wzorem:

$$D_t = D_{t-1} - \sum_{i=E,M,C,I} WZ_{it}; \quad (10)$$

dług D_t może przyjmować wartości dodatnie lub ujemne.

Popyt na produkcję sektora C jest kształtowany przez część dochodu dyspozycyjnego przeznaczanego na zakup dóbr C i saldo wymiany zagranicznej. Z równości podaży i popytu wynika zależność:

$$X_{C1t} + X_{C2t} = (1 - \lambda)\rho_t Y_t^d + WZ_{Mt}, \quad (11)$$

gdzie $(1 - \lambda)\rho_t Y_t^d$ oznacza krajowy popyt na dobra sektora C .

Popyt na produkcję sektora I jest kształtowany przez część dochodu dyspozycyjnego przeznaczanego na zakup dóbr inwestycyjnych i saldo wymiany zagranicznej. Z równości podaży i popytu wynika zależność:

$$X_{I1t} + X_{I2t} = (1 - \rho_t)Y_t^d + WZ_{It}, \quad (12)$$

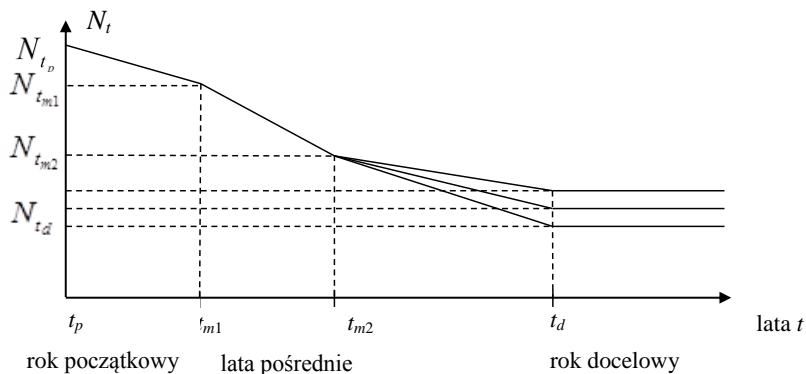
gdzie wyrażenie $(1 - \lambda)\rho_t Y_t^d$ oznacza część dochodu dyspozycyjnego przeznaczanego na inwestycje. Ponadto, zachodzi równość:

$$\sum_{i=E,M,C,I} \sum_{j=1,2,3} I_{ijt} = (1 - \rho_t)Y_t^d. \quad (13)$$

OPTYMALIZACJA DWUKRYTERIALNA

Zakładamy, że obniżenie emisji CO₂ jest wprowadzane w UE w ten sposób, że Komisja UE przyznaje poszczególnym krajom zmniejszającą się w czasie liczbę pozwoleń na emisję. Przyjęto przedziałami liniową trajektorię obniżania liczby pozwoleń (rysunek 1), przy której osiągnięte są określone poziomy emisji w latach pośrednich i roku docelowym. Emisja w poszczególnych latach może się różnić od trajektorii pozwoleń, ponieważ prowadzony jest handel pozwoleniami.

Rysunek 1. Trajektorja pozwoleń na emisję; rok początkowy $t_0 = 2010$, lata pośrednie $t_{m1} = 2020$, $t_{m2} = 2030$, rok docelowy $t_d = 2050$



Źródło: opracowanie własne

Liczby pozwoleń N_{t_0} w roku początkowym oraz $N_{t_{m1}}$ i $N_{t_{m2}}$ w latach pośrednich są określone zgodnie z ustaleniami KE. Liczba pozwoleń N_{t_d} w roku docelowym jest traktowana jako zmienna podlegająca przyszłym ustaleniom i traktowana jako kryterium optymalizacji rozpatrywane równorzędnie z kryterium zdyskontowanej konsumpcji. W rezultacie, rozpatrywane jest zagadnienie optymalizacji dwukryterialnej, w której pierwszym kryterium jest zdyskontowana konsumpcja w rozpatrywanym przedziale czasu, jako miernik dobrobytu; drugim kryterium jest liczba pozwoleń w roku docelowym, reprezentująca dążenie UE zmniejszania emisji. Pierwsze kryterium jest maksymalizowane, drugie – minimalizowane. Zależności modelu mają charakter afiniczny. Mogą więc być przedstawione w postaci:

$$A \cdot x \leq b, \quad (14)$$

gdzie x jest wektorem zmiennych decyzyjnych, A macierzą współczynników, b wektorem ograniczeń. Wektor x obejmuje wszystkie zmienne wymienione w opisie modelu oraz liczbę pozwoleń na emisję w roku docelowym.

$$x^T = (X_{E1t}, X_{E2t}, X_{E3t}, X_{M1t}, X_{M2t}, X_{C1t}, X_{C2t}, X_{I1t}, X_{I2t}, I_{E1t}, I_{E2t}, I_{E3t}, I_{M1t}, I_{M2t}, I_{C1t}, I_{C2t}, I_{I1t}, I_{I2t}, WZ_{E1t}, WZ_{M1t}, WZ_{M2t}, WZ_{C1t}, N_{t_d}). \quad (15)$$

Zmienne modelu, poza zmiennymi $WZ_{E1t}, WZ_{M1t}, WZ_{M2t}, WZ_{C1t}$ są nieujemne.

Oznaczmy przez $y(x)=[y_1(x), y_2(x)]$ wektor rozpatrywanych kryteriów, gdzie y_1 oznacza zdyskontowaną konsumpcję, a y_2 liczbę pozwoleń w roku docelowym. Zgodnie z relacjami modelu kryteria mogą być wyrażone w postaci:

$$y_i = c_i^T \cdot x + d_i, \quad (16)$$

gdzie $c_i, d_i, i=1,2$ są wektorami współczynników.

Kryteria mają charakter konfliktowy, dlatego rozpatrywane jest zadanie optymalizacji dwukryterialnej, w której poszukuje się zmiennych decyzyjnych spełniających ograniczenia modelu, które łącznie maksymalizują y_1 i minimalizują y_2 . Ograniczenia modelu określają zbiór dopuszczalnych zmiennych decyzyjnych w wektorowej przestrzeni wartości zmiennych. Relacje modelu określają zbiór \mathbf{Y} osiągalnych wartości kryteriów w przestrzeni wyników \mathbf{R}^2 . Poszukujemy Pareto-optimalnych rozwiązań w tym zbiorze. Zbiór \mathbf{Y} nie jest określony jawnie. Poszczególne punkty tego zbioru mogą być obliczane w symulacjach komputerowych. Poszukujemy wektorów zmiennych decyzyjnych, dla których osiągnęte są Pareto optymalne wektory kryteriów.

Wyznaczanie i analiza rozwiązań Pareto optymalnych realizowana jest z zastosowaniem metody punktu referencyjnego [Wierzbicki i in. 2000], wykorzystującej ideę funkcji osiągnięcia aproksymującej porządek. Zgodnie z tym podejściem, osoba wykonująca analizę podaje punkty referencyjne w przestrzeni kryteriów. Dla każdego punktu referencyjnego system komputerowy wyznacza

rozwiązanie Pareto optymalne w zbiorze Y . Można w ten sposób wygenerować reprezentację zbioru rozwiązań Pareto optymalnych.

Rozwiązania reprezentujące Pareto optymalny brzeg zbioru Y są wyznaczone przez wielokrotne, dla różnych punktów referencyjnych, rozwiązywanie zadania optymalizacji:

$$\max_{x \in X_0} [s(y(x), y^*)] \quad (17)$$

gdzie: X_0 - jest zbiorem dopuszczalnych zmiennych, zdefiniowanym przez relacje modelu, $y^* = (y_1^*, y_2^*)$ - punktem referencyjnym (aspiracji) w przestrzeni kryteriów R^2 , $s(y, y^*)$ - funkcją osiągnięcia aproksymującą porządek.

Zastosowano odpowiednią funkcję osiągnięcia oraz zaproponowano przekształcenie powyższego zadania do zadania programowania liniowego rozwiązywanego wielokrotnie [Gadomski, Kruś, Nahorski 2015].

WYNIKI SYMULACJI

Wyniki optymalizacji dwukryterialnej dla rozpatrywanego czterosektorowego modelu gospodarki Polski przedstawiono w tabeli 1, oraz na kolejnych rysunkach. Rok 2010 przyjęto za rok startowy. Założono, że przed rokiem startowym gospodarka rozwijała się w warunkach równowagi długookresowej, zachowującej proporcje między sektorami. Nasza analiza koncentruje się na okresie przejściowym, w którym następują zmiany technologii, przy różnych założeniach dotyczących postępu technicznego.

Tabela 1. Wyniki wybranych wariantów optymalizacji wielokryterialnej

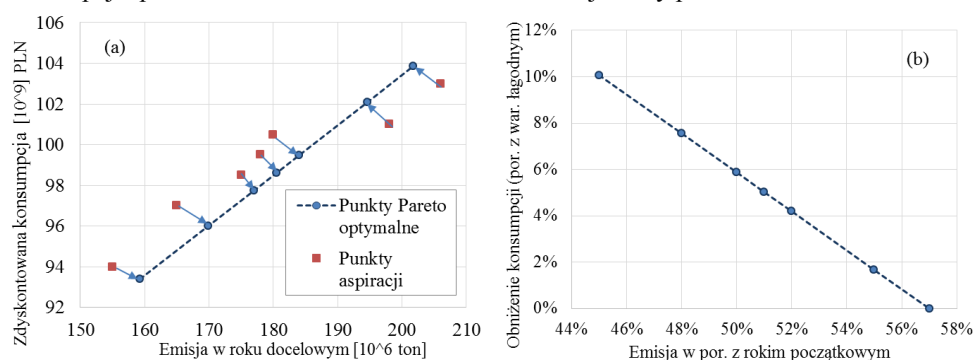
Wariant	Punkty aspiracji		Punkty Pareto optymalne					
	Emisja w roku docelowym [10 ⁶ ton]	Zdyskontowana konsumpcja [10 ⁹] PLN	Emisja w por. z rokiem początkowym	Emisja w roku docelowym [10 ⁶ ton]	Zdyskontowana konsumpcja [10 ⁹] PLN	Obniżenie konsumpcji w por. z war.	Obniżenie konsumpcji w %. (por. z war. łagodnym)	Skumulowana konsumpcja [10 ⁹] PLN
1 restrykcyjny	155	94,0	45%	159,3	93,4	10,46	10,07%	230,7
2	165	97,0	48%	169,9	96,0	7,84	7,55%	241,1
3	175	98,5	50%	177,0	97,7	6,10	5,87%	248,1
4 pośredni	178	99,5	51%	180,5	98,6	5,23	5,03%	251,6
5	180	100,5	52%	184,1	99,5	4,36	4,20%	255,0
6	198	101,0	55%	194,7	102,1	1,74	1,68%	265,5
7 łagodny	206	103,0	57%	201,7	103,8	0,00	0,00%	272,5

Źródło: opracowanie własne

Emisja gazów cieplarnianych w Polsce w roku 2005 wyniosła 353,9 mln ton CO₂eq [Olecka i in. 2014]. Ścieżka zmniejszanej liczby pozwoleń jest określona zgodnie z rysunkiem 1. Liczby pozwoleń w latach pośrednich 2020 i 2030 zostały przyjęte odpowiednio na poziomie 79% i 57% emisji w roku 2005, zgodnie z dyrektywami UE, co odpowiada redukcji emisji odpowiednio o 21% i 43%.

Liczba pozwoleń w roku docelowym jest minimalizowana przy jednoczesnej maksymalizacji zdyskontowanej konsumpcji w rozpatrywanym przedziale czasu. Dla zakładanych punktów referencyjnych, zaznaczonych kwadratami na rysunku 2, obliczono odpowiadające im rozwiązania Pareto optymalne (niezdominowane). Punkty te określają reprezentację brzegu Pareto (zaznaczonego linią przerywaną) zbioru \mathbf{Y} osiągalnych wartości kryteriów. Wartości kryteriów określone przez punkty powyżej tej linii nie są osiągalne. Liczbowe wyniki optymalizacji przedstawia tabela 1.

Rysunek 2. (a) Reprezentacja zbioru rozwiązań Pareto optymalnych, (b) Obniżenie konsumpcji spowodowane dostosowaniem do obniżanej liczby pozwoleń



Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 3 przedstawiono wybrane wyniki symulacji (dla scenariuszy łagodnego i restrykcyjnego) podstawowych wielkości makroekonomicznych: (a) PKB, (b) konsumpcji, (c) inwestycji, (d) emisji CO_2 . W obu wariantach zmiany są skupione w początkowym okresie, w którym dochodzi do wyboru czystszych technologii we wszystkich sektorach (z wyjątkiem sektora *I*). Uzyskane wyniki obejmują również wielkości zdolności produkcyjnych, produkcji, inwestycji w sektorach w rozbiciu na poszczególne technologie, jak również wielkości eksportów i importów sektorów produkcyjnych.

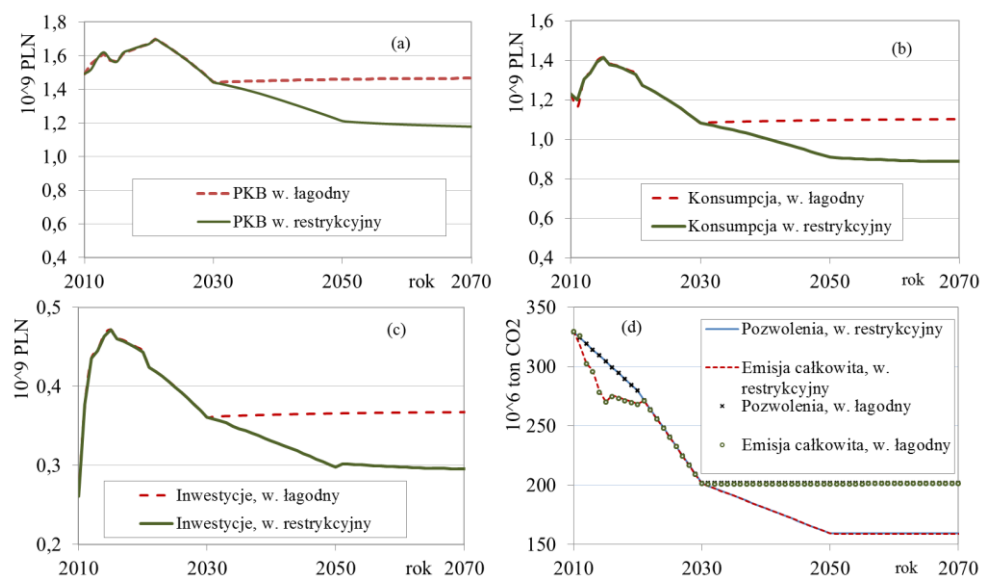
Dla oczekiwanego obniżenia emisji jest niezwłoczna wymiana technologii. Szczegółowe wyniki obliczeń pokazują, jak optymalna wymiana powinna przebiegać w czasie w poszczególnych sektorach. Stosowanie nowych technologii jest uwarunkowane wysokimi cenami pozwoleń na emisję.

Wyniki te wskazują, że po okresie intensywnego wzrostu gospodarczego następuje okres recesji poprzedzający okres stagnacji. Należy podkreślić, że omawiane tu wyniki są uzyskane przy założeniu braku postępu technicznego. Przeprowadzono również nieprezentowane tu badanie uwzględniające postęp techniczny, którego wydźwięk jest mniej pesymistyczny.

Na rysunku 3 (d) przedstawiono trajektorie pozwoleń oraz całkowite emisje w wariantach łagodnym i restrykcyjnym. Całkowite emisje w poszczególnych latach różnią się od liczby pozwoleń przyznanych na te lata ze względu na

uwzględniony w modelu handel tymi pozwoleniami. Obliczenia te pozwoliły na oszacowanie kosztu ograniczenia emisji CO₂ w kategoriach obniżenia konsumpcji przedstawiane w tabeli 1 oraz na wykresie, patrz rysunek 2 (b). Wyróżniono trzy warianty: łagodny, zakładający obniżenie emisji do poziomu 57% emisji z roku początkowego, pośredni (obniżenie emisji do poziomu 51% emisji roku początkowego) i restrykcyjny (obniżenie emisji do poziomu 45% emisji roku początkowego). Warto zwrócić uwagę, że przejście od wariantu łagodnego do restrykcyjnego powoduje spadek konsumpcji o 10%.

Rysunek 3. Kształtowanie się podstawowych zmiennych makroekonomicznych



Źródło: opracowanie własne

Wymagane obniżenie emisji zgodnie z trajektorią przyznawanych pozwoleń zakłada dotychczasowy wzrost gospodarczy, ale po okresie zmian technologii, gospodarka powraca do wzrostu z nową ścieżką równowagi.

PODSUMOWANIE

Dla realizacji postawionego celu opracowano makroekonomiczny model gospodarki polskiej, w którym sektory produkcyjne mają do wyboru po kilka technologii produkcji. Decyzje o wielkościach produkcji, wykorzystaniu technologii i zdolności produkcyjnych, jak również o kształtowaniu się wymiany handlowej z zagranicą są podejmowane w wyniku rachunku optymalizacji dwukryterialnej, w której jednocześnie z maksymalizacją konsumpcji minimalizowana jest emisja CO₂. Opracowano odpowiedni algorytm obliczeniowy wykorzystujący metodę punktu referencyjnego, w którym zadanie optymalizacji jest rozwiązywane wielokrotnie przy użyciu standardowego solwera liniowego.

Wyniki symulacji pozwalają na oszacowanie, jakie są koszty dostosowania gospodarki do koniecznej redukcji gazów cieplarnianych.

Zastosowana metoda obejmująca model i narzędzie optymalizacji mogą być wykorzystane do wielowariantowych analiz uwzględniających różne technologie i ich ewolucje.

BIBLIOGRAFIA

- Gadomski J., Kruś L., Nahorski Z. (2015) A multicriteria model for analysis of the impact of EU GHG limiting policies on economic growth: the case of Poland. Instytut Badań Systemowych PAN, Raport Badawczy RB/23/2015, Warszawa.
- Antoszewski M., Boratyński J. et al. (2015) CGE Model PLACE. MF Working Paper Series, Ministry of Finance, Republic of Poland, 22.
- Boratyński J. (2012) Historical Simulations with a Dynamic CGE Model: Results for an Emerging Economy. Ecomod 2012 Conference, Seville.
- Gadomski J., Kruś L., Nahorski Z. (2014) A Multicriteria Model for Analysis of the Impact of GHG Limiting Policies on Economic Growth, The Case of Poland. Systems research Institute of PAS, Working Paper RB/37/2014, Warszawa.
- Central Statistical Office, Republic of Poland (2011) Input-Output Table at basic Prices in 2010.
- Olecka A., Bebkiewicz K., Dębski B. et al. (2014) National Inventory Report 2014. GHG Inventories for Poland for the years 1988-2011. The National Centre of Emission Management, Warsaw, Poland (in Polish).
- Roberts B. M. (1994) Calibration procedure and the Robustness of CGE Models: Simulations with a Model for Poland. Economics of Planning, 189-210, Kluwer Academic Publishers.
- Wierzbicki A. P., Makowski M., Wessels J. (2000) Model-based Decision Support Methodology with Environmental Applications. Kluwer Academic Press, Dordrecht, Boston.

BICRITERIA ANALYSIS OF THE CONSEQUENCES OF THE CO₂ EMISSION CURBING POLICY IN POLAND

Abstract: Paper presents the bicriteria analysis of the impact of the limits of the allowances for CO₂ emissions on economic growth of Poland. The long-term model is presented, which consists of four production sectors, which produce: energy, intermediary goods, consumer goods and investment goods, respectively, as well as the consumption sector and the foreign trade sector. In each production sector different technologies are considered. Trade in goods and the emission allowances are accounted for. Contradictory goals are considered: the consumption maximization, and minimization of gaseous emissions.

Keywords: economic modelling, multisector models, optimization, multicriteria optimization, emissions of the greenhouse gases