

WYKORZYSTANIE TRÓJSEKTOROWEGO MODELU WZROSTU DO ANALIZY WPLYWU OGRANICZENIA EMISJI GHG NA WYBÓR TECHNOLOGII PRODUKCJI

Jan Gadomski

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

Model jest narzędziem analizy wpływu wprowadzenia limitów emisji GHG na procesy wzrostu gospodarczego oraz na struktury: sektorową i technologiczną produkcji. W pracy zbadano procesy przejścia od wzrostu zrównoważonego przy użyciu kapitału o wysokiej emisyjności do wzrostu zrównoważonego wykorzystującego kapitał charakteryzujący się niższą emisyjnością zanieczyszczeń. W szczególności w ramach analizy średniookresowej zbadano przejście do gospodarki, która w stanie równowagi osiągnęła limit emisji i rozwija się z zerową stopą wzrostu. W pracy wyprowadzono zależności pozwalające na wyznaczenie struktury produkcji w warunkach wzrostu zrównoważonego i stanu ustalonego, jak również bezwzględne wielkości produkcji poszczególnych sektorów po osiągnięciu stanu równowagi.

1. Wstęp

Prezentowany model jest narzędziem analiz gospodarki dokonującej konwersji technologii wytwarzania pod wpływem dostosowania do limitów emisji zanieczyszczeń. Limity te nie mają wyłącznie charakteru twardego ograniczenia (jak np. kwoty połowowe w rybołówstwie), lecz są związane z mechanizmem handlu pozwoleniami na emisję pomiędzy tymi krajami (i przedsiębiorstwami), które nie wykorzystwały przyznanym im limitów oraz krajami, które przekroczyły przyznane im limity. Celem analiz jest odpowiedź na pytanie o skutki tego dostosowania dla wzrostu gospodarczego oraz sektorowej i technologicznej struktury produkcji.

W budowie modelu wykorzystano doświadczenie zdobyte przy konstrukcji wielosektorowego modelu gospodarki polskiej, Gadomski, Woroniecka et al. (1998) oraz rodziny modeli jednosektorowych służących do analizy wpływu ograniczenia emisji na konwersję technologiczną, Gadomski, Nahorski (2007a,b,c, 2008).

Prezentowany model należy do kategorii średniookresowych i długookresowych modeli wzrostu. Analiza średniookresowa opiera się na założeniu, że liczba

dostępnych technologii wytwarzania jest ograniczona (i rozsądnie nieduża), oraz że parametry opisujące te technologie nie ulegają zmianom. W ramach analizy średniookresowej badane są warunki wzrostu zrównoważonego (bez przyjmowania założenia o pełnym wykorzystaniu zdolności produkcyjnych), odpowiadającego – w kategoriach teorii cyklu koniunkturalnego – długookresowej ścieżce wzrostu. Wzrost zrównoważony jest określany jako wzrost zachowujący równowagę sektorową produkcji, czyli taki, przy którym sektorowe podaż i popyt są sobie równe (przy czym zdolności produkcyjne nie muszą być w pełni wykorzystane). Czynnikiem zmian są inwestycje w kapitał reprezentujący poszczególne technologie. Zasoby siły roboczej nie stanowią aktywnego ograniczenia wzrostu. Nie jest rozważany i uwzględniany wpływ emisji zanieczyszczeń na produktywności czynników produkcji.

W ramach analizy długookresowej badany jest wzrost w warunkach oddziaływania zmian technologicznych (postępu technicznego). Różnica, w odniesieniu do analizy średniookresowej, polega na tym, że zmianom ulegają nie tylko wielkości produkcji oraz jej struktura technologiczna, lecz również dostępne technologie podlegają ewolucji wyrażającej się zmianami parametrów.

Analiza procesów wzrostu przeprowadzona zostanie w dwóch etapach. W etapie pierwszym rozważania są prowadzone w ramach analizy średniookresowej. W etapie drugim, tj. w analizie długookresowej, badany jest wzrost zrównoważony uwzględniający postęp techniczny oraz rozważane są alternatywne scenariusze postępu technicznego (ewolucji parametrów dostępnych technologii). Podział na dwa etapy pozwala na oddzielenie zagadnienia wymiany technologii, jako problemu wyboru wariantu inwestycyjnego (problem średniookresowy) od trudnych do prognozowania procesów „czystego” postępu technicznego (problem długookresowy).

Skonstruowany dla celów analizy trójsektorowy model makroekonomiczny jest modelem dynamicznym, a jego analiza oparta jest na metodzie statyki porównawczej, tzn. na badaniu modelu w punktach, w których jest w stanie równowagi. Ograniczenie analizy do badania funkcjonowania gospodarki w średnim i długim okresie pozwala na oderwanie się od cyklu koniunkturalnego i przedstawienie jej rozwoju za pomocą tendencji średnio- i długookresowej, nie uwzględniając wahań krótkookresowych. Ponadto, podejście to umożliwia przyjęcie dobrze uzasadnionego przesłankami założenia, że tendencję długookresową charakteryzuje niepełne wykorzystanie zdolności produkcyjnych w sektorach.

Podstawowe pytanie, na które wyniki uzyskane z modelu pomagają odpowiedzieć, dotyczy wpływu ograniczenia emisji zanieczyszczeń na wielkość i strukturę produkcji.

W modelu gospodarka składa się z trzech sektorów produkcyjnych: M – wytwarzającego dobra pośrednie, C – wytwarzające dobra konsumpcyjne oraz I wytwarzającego dobra inwestycyjne / środki trwałe. Niektóre z przyjętych rozwiązań modelowych stanowią rozszerzenie do trzech sektorów dwusektorowego modelu produkcji Marksa (według Langego, 1961), zastosowane w pracy Gadomski, Woroniecka et al. (1998).

Produkty sektora M są wykorzystywane we wszystkich trzech sektorach jako nakłady pośrednie. Produkty sektora C są dobrami konsumpcyjnymi, nabywanymi za dochody uzyskiwane w sektorach M , C i I , odpowiednio: C_M , C_C , C_I . Sektor I wytwarza dobra inwestycyjne, tworzące środki trwałe we wszystkich trzech sektorach i technologiach produkcji. W modelu nie uwzględniono wymiany zagranicznej i sektora rządowego.

2. Opis modelu

Technologia produkcji

W każdym z sektorów produkcja może być uzyskiwana przy stosowaniu jednej lub większej liczby technologii. Nośnikiem technologii są środki trwałe (zasoby kapitału), a j -ta technologia stosowana w i -tym sektorze jest reprezentowana przez wektor współczynników $T_i^{(j)}$:

$$T_i^{(j)} = (\gamma_i^{(j)}, \alpha_i^{(j)}, \beta_i^{(j)}, \delta_i^{(j)}, \varepsilon_i^{(j)}), i = M, C, I; j = 1, \dots, N_i; \quad (1)$$

gdzie:

- i – numer/ symbol sektora, $i = M, C, I$;
- j – numer technologii dostępnej dla i -tego sektora, $j = 1, \dots, N_i$;
- N_i – liczba dostępnych technologii w sektorze i ,
- $\gamma_i^{(j)}$ – współczynnik zużycia własnego w i -tym sektorze i j -tej technologii,
- $\alpha_i^{(j)}$ – produktywność kapitału w i -tym sektorze i j -tej technologii,
- $\beta_i^{(j)}$ – przeciętna wydajność pracy w i -tym sektorze i j -tej technologii,
- $\delta_i^{(j)}$ – współczynnik deprecjacji kapitału w i -tym sektorze i j -tej technologii,
- $\varepsilon_i^{(j)}$ – emisyjność jednostkowa produkcji wytworzonej przy użyciu j -tej technologii w i -tym sektorze.

O powyżej zdefiniowanych współczynnikach zakłada się, że w analizie średnioterminowej mają ustalone wartości, podczas gdy w dłuższym okresie ich wartości podlegają ewolucji.

W każdym okresie t sektor i , $i = M, C, I$, dysponuje środkami trwałymi (kapitałem) służącymi do produkcji za pomocą N_i dostępnych w danym sektorze technologii. O wykorzystywanych w sektorze i technologiach w liczbie N_i założymy, że pozwalają na wytworzenie jakościowo identycznych, dla nabywców nierozróżnialnych produktów. Ilość kapitału na początku roku t wykorzystywanego w produkcji posługującej się (związaną, skojarzoną z) j -tą technologią oznaczmy przez $K_{it}^{(j)}$.

W dalszym ciągu zasoby kapitału oraz strumienie produkcji i zużycia określone są w jednostkach pieniężnych w cenach stałych.

Produkcja

W opisie modelu pod pojęciem produkcji rozumiana jest produkcja globalna zarówno poszczególnych sektorów jak i całej gospodarki. Celem tego ujęcia jest wyodrębnienie sektora wytwarzającego produkty, takie jak materiały, surowce,

usługi produkcyjne i in., będące nakładami pośrednimi w pozostałych sektorach. Sektor ten jest źródłem większości emisji tzw. gazów cieplarnianych.

Produkcja potencjalna $P_{it}(j)$ (zdolność produkcyjna) j -tej technologii w i -tym sektorze w okresie t jest definiowana jako produkcja globalna możliwa do uzyskania przy użyciu kapitału/środków trwałych reprezentujących j -tą technologię oraz nakładów siły roboczej:

$$P_{it}^{(j)} = \min [\alpha_i^{(j)} K_{it}^{(j)}, \beta_i^{(j)} L_{it}^{(j)}], \quad i = M, C, I; \quad j = 1, \dots, N_i \quad (2)$$

gdzie przez $K_{it}^{(j)}$ oznaczony został zasób środków trwałych stosowanych w j -tej technologii w i -tym sektorze na początku okresu t , a przez $L_{it}^{(j)}$ nakład siły roboczej.

Zależność (2) produkcji od nakładów czynników produkcji jest zgodna z jednosektorowym modelem Harroda-Domara, za Allenem (1975), lub funkcją produkcji Leontiewa; jej poziomicę (izokwantę) dla wybranej wielkości produkcji Q_0 przedstawiono na Rys. 1. Przy założeniu, że siła robocza występuje w dostatecznej obfitości długookresowa zdolność produkcyjna j -tej technologii w i -tym sektorze jest funkcją zasobu kapitału:

$$P_{it}^{(j)} = \alpha_i^{(j)} K_{it}^{(j)}, \quad i = M, C, I, \quad j = 1, \dots, N_i. \quad (3)$$

Z własności funkcji produkcji Leontiewa wynika, że określona wielkość produkcji $Q_{it}^{(j)}$ uzyskana za pomocą j -tej technologii w sektorze i -tym jest wytwarzana najefektywniej przy nakładach kapitału i pracy równych odpowiednio:

$$Q_{it}^{(j)} / \alpha_i^{(j)} \text{ oraz } Q_{it}^{(j)} / \beta_i^{(j)}. \quad i = M, C, I, \quad j = 1, \dots, N_i. \quad (4)$$

Całkowita zdolność produkcyjna P_{it} sektora i stanowi sumę:

$$P_{it} = \sum_{j=1}^{N_i} P_{it}^{(j)} \quad i = M, C, I. \quad (5)$$

Wytworzona w okresie t w i -tym sektorze przy użyciu j -tej technologii produkcja globalna $Q_{it}^{(j)}$ spełnia warunek:

$$P_{it}^{(j)} \geq Q_{it}^{(j)}; \quad i = M, C, I; j = 1, \dots, N_i.$$

Za przyjęciem powyższej zależności produkcji od nakładów czynników produkcji przemawia szereg przesłanek. Po pierwsze, określenie poziomu wykorzystania zdolności produkcyjnych jest zawsze trudne. Po drugie, efektywna wielkość technicznego uzbrojenia pracy, przy założeniu pewnego zakresu substytucyjności między pracą i kapitałem, zależy od liczby osób aktywnych zawodowo i stopy bezrobocia. Zaobserwowana w długim okresie tendencja wzrostowa technicznego uzbrojenia pracy jest wypadkową dwóch składowych: długookresowego względnego drożenia siły roboczej i kapitałochłonnego postępu technicznego. Powyższe założenia znacznie upraszczają model nie powodując zarazem zwiększenia arbitralności.

Gdy popyt D_{it} na produkt sektora i , $i = M, C, I$, jest równy lub mniejszy od zdolności produkcyjnych tego sektora, to wytworzona wielkość produkcji Q_{it} jest

równa popytowi na produkcję sektora i , $i=M, C, I$; pod warunkiem dostępności produktów sektora M . Gdy popyt D_{it} na produkt sektora i , $i= M, C, I$; jest większy od zdolności produkcyjnych tego sektora, to wytworzona wielkość produkcji Q_{it} jest równa zdolnościom produkcyjnym tego sektora. Relacje te opisuje poniższe wyrażenie:

$$Q_{it} = \begin{cases} D_{it}, & P_{it} \geq D_{it}; \\ P_{it}, & P_{it} < D_{it}. \end{cases} = \min[D_{it}, P_{it}], \quad i=M, C, I. \quad (6)$$

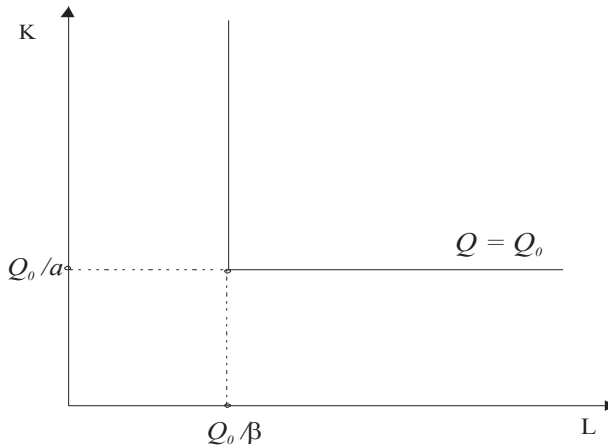
Stopień wykorzystania zdolności produkcyjnych $\lambda_{it}^{(j)}$ związanych z j -tą technologią w i -tym sektorze w roku t jest definiowany w następujący sposób:

$$\lambda_{it}^{(j)} = Q_{it}^{(j)} / P_{it}^{(j)}, \quad i = M, C, I, j = 1, \dots, N_i, \quad (7)$$

a stopień wykorzystania zdolności produkcyjnych w całym sektorze i :

$$\lambda_{it} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} Q_{it}^{(j)}}{\sum_{j=1}^{N_i} P_{it}^{(j)}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \lambda_{it}^{(j)} P_{it}^{(j)}}{P_{it}} \quad i = M, C, I, \quad (8)$$

na podstawie zależności (5) i (7).



Rys. 1. Izokwanta funkcji produkcji Leontiewa

Określenie rozkładu wykorzystania zdolności produkcyjnych, związanych z poszczególnymi technologiami w obrębie każdego sektora jest problemem złożonym. Najprostsze założenie, to jednakowy stopień wykorzystania zdolności produkcyjnych związanych z poszczególnymi technologiami produkcji. Warto mieć jednak na uwadze, że nie można z góry wykluczyć sytuacji, w której korzystne mogłoby okazać się pełniejsze wykorzystanie technologii uznanych za efektywniejsze, a w mniejszym stopniu technologii uznanych za recesywne (ze względu na przyjęte kryterium lub ograniczenie).

Produkcja globalna wytworzona w i -tym sektorze przy użyciu środków trwałych reprezentujących N_i technologię jest równa:

$$Q_{it} = \sum_{j=1}^{N_i} Q_{it}^{(j)} \quad i = M, C, I. \quad (9)$$

Część produkcji globalnej jest zużywana w procesie produkcji, zatem produkcja Y_{it} netto i -tego sektora wynosi:

$$Y_{it} = \sum_{j=1}^{N_i} Y_{it}^{(j)} = \sum_{j=1}^{N_i} (1 - \gamma_i^{(j)}) Q_{it}^{(j)}, \quad i = M, C, I; \quad (10)$$

gdzie $\gamma_i^{(j)}$ oznacza współczynnik zużycia własnego w j -tej technologii stosowanej w i -tym sektorze, a przez $Y_{it}^{(j)}$ produkt netto wytworzony w okresie t w i -tym sektorze przy użyciu j -tej technologii.

Popyt

Podział produktu wytworzonego w poszczególnych sektorach dokonuje się w następujący sposób¹.

Produkcja Q_{Mt} sektora M , wytwarzającego dobra, stanowiące nakłady pośrednie w sektorach M , C i I :

$$Q_{Mt} = \sum_{j=1}^{N_M} \gamma_M^{(j)} Q_{Mt}^{(j)} + \sum_{j=1}^{N_C} \gamma_C^{(j)} Q_{Ct}^{(j)} + \sum_{j=1}^{N_I} \gamma_I^{(j)} Q_{It}^{(j)}, \quad (11)$$

gdzie wyrażenia: $\sum_{j=1}^{N_M} \gamma_M^{(j)} Q_{Mt}^{(j)}$, $\sum_{j=1}^{N_C} \gamma_C^{(j)} Q_{Ct}^{(j)}$, $\sum_{j=1}^{N_I} \gamma_I^{(j)} Q_{It}^{(j)}$

oznaczają wielkości zużycia pośredniego odpowiednio w sektorach: M , C i I . Z równania (11) wynika ponadto, że produkt netto w sektorze M jest równy zużyciu pośredniemu w dwóch pozostałych sektorach.

Produkcja Q_{Ct} sektora C jest równa wydatkom konsumpcyjnym z dochodów wypracowanych w sektorach M , C i I :

$$Q_{Ct} = C_{Mt} + C_{Ct} + C_{It}. \quad (12)$$

Sektor I wytwarza dobra inwestycyjne Q_{It} nabywane przez sektory M , C i I :

$$Q_{It} = I_{Mt} + I_{Ct} + I_{It}, \quad (13)$$

przy czym:

$$I_{Mt} = \sum_{j=1}^{N_M} I_{Mt}^{(j)},$$

¹ Ponieważ model ma charakter średnio i długookresowy, kształtowanie się zapasów nie jest rozważane.

$$I_{Ct} = \sum_{j=1}^{N_C} I_{Ct}^{(j)},$$

$$I_{It} = \sum_{j=1}^{N_I} I_{It}^{(j)}.$$

Podział

W wyniku sprzedaży wytworzonej w sektorze i produkcji Q_{it} , $i = M, C, I$; następuje opłata wartości przeniesionej oraz podział na wynagrodzenia i inwestycje:

$$Q_{Mt} = M_{Mt} + C_{Mt} + I_{Mt}, \quad (14)$$

$$Q_{Ct} = M_{Ct} + C_{Ct} + I_{Ct}, \quad (15)$$

$$Q_{It} = M_{It} + C_{It} + I_{It}. \quad (16)$$

gdzie wartość przeniesiona M_{it} , $i = M, C, I$; jest równa:

$$M_{Mt} = \sum_{j=1}^{N_M} \gamma_M^{(j)} Q_{Mt}^{(j)},$$

$$M_{Ct} = \sum_{j=1}^{N_C} \gamma_C^{(j)} Q_{Ct}^{(j)},$$

$$M_{It} = \sum_{j=1}^{N_I} \gamma_I^{(j)} Q_{It}^{(j)}.$$

Inwestycje i kapitał

Nakłady inwestycyjne I_{it} w sektorze i , $i = M, C$ i I ; w roku t są sumą nakładów inwestycyjnych w kapitał reprezentujący różne technologie produkcji:

$$I_{it} = \sum_{j=1}^{N_I} I_{it}^{(j)}, \quad i = M, C, I; \quad (16)$$

gdzie $I_{it}^{(j)}$ oznacza poniesiony w roku t nakład inwestycyjny w i -tym sektorze na j -tą technologię. Zarówno wielkości nakładów inwestycyjnych I_{it} , jak i ich struktura, tzn. rozbitcie na inwestycje w poszczególne technologie, są wielkościami decyzyjnymi.

Poniesione w roku t inwestycje $I_{it}^{(j)}$ w i -tym sektorze w j -tej technologii powiększają zasób kapitału związanego z j -tą technologią:

$$K_{it+1}^{(j)} = K_{it}^{(j)} + I_{it}^{(j)} - \delta_i^{(j)} K_{it}^{(j)} = (1 - \delta_i^{(j)}) K_{it}^{(j)} + I_{it}^{(j)}; \quad i = M, C, I; j = 1, \dots, N_i, \quad (17)$$

mają zatem wpływ na zdolności produkcyjne w następnym okresie.

Emisja zanieczyszczeń

Produkcji $Q_{it}^{(j)}$ uzyskanej przez wykorzystanie kapitału reprezentującego technologię j -tą w sektorze i -tym towarzyszy emisja zanieczyszczeń $E_{it}^{(j)}$ równa:

$$E_{it}^{(i)} = \varepsilon_i^{(i)} Q_{it}^{(i)}. \quad (18)$$

Zanieczyszczenie E_{it} wyemitowane przez i -ty sektor jest równe:

$$E_{it} = \sum_{j=1}^{N_i} E_{it}^{(j)}, \quad i = M, C, I; \quad (19)$$

a emisja całkowita E_t trzech sektorów jest opisana wzorem:

$$E_t = E_{Mt} + E_{Ct} + E_{It}. \quad (20)$$

Jak wynika z zależności (18), (19) i (20), wielkości emisji na poszczególnych stopniach dezagregacji są liniową funkcją wielkości produkcji (lub kapitału i stopnia wykorzystania zdolności produkcyjnej, wzór (7)). Dynamika emisji zależy również od zmiany struktury produkcji ze względu na zmiany struktury technologicznej jak i proporcje rozwoju sektorów.

3. Wzrost a technologia i struktura produkcji

Wzrost

Analiza procesów wzrostu przeprowadzona zostanie w dwóch etapach. W etapie pierwszym zakładamy, że postęp techniczny nie występuje, tzn. parametry istniejących technologii nie ulegają zmianom. W etapie drugim rozważane są alternatywne scenariusze postępu technicznego (ewolucji parametrów dostępnych technologii). Celem podziału analizy na dwa etapy jest odseparowanie zagadnienia wymiany technologii, sprowadzonego do problemu wyboru wariantu inwestycyjnego, od trudnych do prognozowania procesów „czystego” postępu technicznego.

Dalsze rozważania koncentrować się będą wokół opisu gospodarki dokonującej przejścia od wzrostu o stałej stopie przy wykorzystaniu ustalonej technologii wytwarzania do gospodarki osiągającej stan równowagi przy zerowej stopie wzrostu z powodu napotkania bariery limitu emisji zanieczyszczeń. Dostosowanie gospodarki do stanu bez wzrostu polega na dokonaniu konwersji technologicznej polegającej na zastąpieniu technologii powodujących wyższe emisje technologiami² mniej szkodzącymi środowisku naturalnemu.

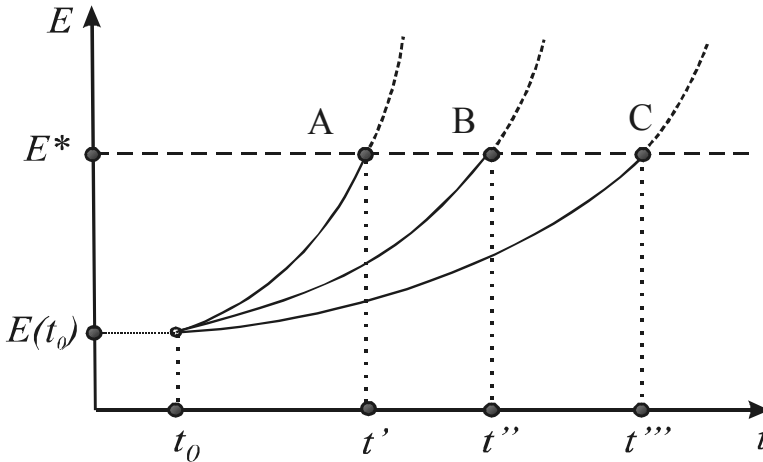
W procesie konwersji średniookresowej wyróżnione są trzy okresy. Okres pierwszy charakteryzuje wzrost bez ograniczeń ze stałą stopą wzrostu oraz ustalonymi optymalnymi technologiami produkcji. Na poziomie pojedynczego sektora oznacza to stosowanie bądź jednej technologii, bądź kilku technologii w ustalonej proporcji. Formalną konsekwencją tego założenia jest możliwość wprowadzenia znacznie uproszczonego zapisu, pozwala ono bowiem na traktowanie kapitału jako wielkości technologicznie jednorodnej.

² Proces konwersji jest kosztowny i dlatego jego zainicjowanie jest wymuszone przez ingerencję władzy gospodarczej w rachunek efektywności inwestycji, polegającą na internalizacji kosztów zanieczyszczenia środowiska.

Okres drugi, to czas, w którym w ramach jednego sektora współlistnieją technologie wykorzystywane w okresie pierwszym oraz technologie wprowadzone w ramach polityki ograniczenia emisji. Okres drugi charakteryzują zmiany struktur technologicznej kapitału oraz produkcji.

Okres trzeci następuje po okresie drugim i charakteryzuje się ustalonymi nowymi strukturami: technologiczną, kapitału, produkcji, konsumpcji i inwestycji oraz emisji zanieczyszczeń.

Obniżenie emisji o wielkość $E_1 - E_2$ wiąże się ze zmianą technologii i wymaga poniesienia większych nakładów kapitałowych $K_2 - K_1$. Prawdliwość tę przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 2. Wzrost z różnymi stałymi stopami wzrostu a czas osiągnięcia poziomu emisji zanieczyszczeń E^* .

W średnim i długim okresie analizy sektor produkuje przy niepełnym stopniu wykorzystania zdolności produkcyjnych. W tym kontekście można mówić o pewnej wartości średniej tego parametru, charakteryzującej dany sektor. Dla wzrostu długookresowego można przyjąć założenie o utrzymaniu stałych (niekoniecznie jednakowych) wielkości stopnia wykorzystania zdolności produkcyjnych w poszczególnych sektorach. Z uwagi na zachowanie równowagi podaży sektorów i popytu na ich produkcję można tu mówić o wzroście zrównoważonym, aczkolwiek bez pełnego wykorzystania czynników produkcji.

Warunkiem na to, aby produkcja sektora wzrastała ze stałą stopą wzrostu równą r przy stałym stopniu wykorzystania zdolności produkcyjnych λ_i , jest wzrost zasobu kapitału ze stopą wzrostu równą r .

Dzieląc obie strony równania (17) przez K_{it} uzyskujemy zależność:

$$\frac{K_{it+1}}{K_{it}} = (1 - \delta_i) + \frac{I_{it}}{K_{it}}, \quad i = M, C, I. \quad (21)$$

Ponieważ kapitał wzrasta ze stopą wzrostu równą r :

$$\frac{K_{it+1}}{K_{it}} = 1 + r, \quad i = M, C, I;$$

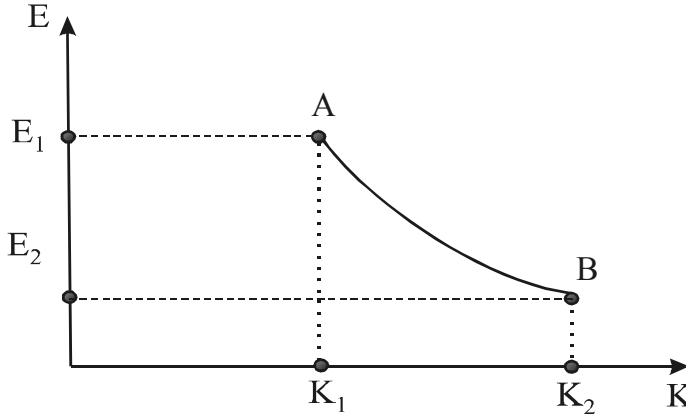
zatem z zależności (21) po prostym przekształceniu uzyskujemy następującą zależność:

$$I_{it} = (r + \delta_i) K_{it}, \quad i = M, C, I. \quad (22)$$

Uwzględniając równania (3) i (7) zależność (22) można przedstawić w następującej postaci:

$$I_{it} = \frac{(r + \delta_i)}{\lambda_i \alpha_i} Q_{it}, \quad i = M, C, I; \quad (23)$$

która opisuje wielkość inwestycji w i -tym sektorze jako funkcję wielkości produkcji, stopy wzrostu oraz stopnia wykorzystania zdolności produkcyjnych.



Rys. 3. Zmiana technologii z bardziej emisyjnej, punkt A, na mniej emisyjną, punkt B.

Korzystając z równań (14), (15) i (16) wielkości wydatków konsumpcyjnych poszczególnych sektorów można opisać za pomocą następującego wzoru:

$$C_{it} = Q_{it} - \gamma_i Q_{it} - I_{it} = \left(1 - \gamma_i - \frac{r + \delta_i}{\lambda_i \alpha_i} \right) Q_{it}, \quad i = M, C, I. \quad (24)$$

Zważywszy, że rozważana jest gospodarka w zdefiniowanym wyżej pierwszym okresie, każdy z sektorów posługuje się jedną technologią. Zatem zależność (11) można przedstawić w postaci uproszczonej:

$$Q_{Mt} (1 - \gamma_M) = \gamma_C Q_{Ct} + \gamma_I Q_{It}, \quad (25)$$

a na podstawie wzoru (23) zależność (13) w następującej postaci:

$$Q_{It} = \frac{(r+\delta_M)}{\lambda_M \alpha_M} Q_{Mt} + \frac{(r+\delta_C)}{\lambda_C \alpha_C} Q_{Ct} + \frac{(r+\delta_I)}{\lambda_I \alpha_I} Q_{It}. \quad (26)$$

Podzielenie równań (25) i (26) przez niezerową wielkość Q_{Mt} oraz uporządkowanie prowadzi do następującego układu równań:

$$\begin{aligned} 1 - \gamma_M &= \gamma_C \frac{Q_{Ct}}{Q_{Mt}} + \gamma_I \frac{Q_{It}}{Q_{Mt}}. \\ \frac{r+\delta_M}{\lambda_M \alpha_M} &= \frac{r+\delta_C}{\lambda_C \alpha_C} \frac{Q_{Ct}}{Q_{Mt}} + \left(1 - \frac{r+\delta_I}{\lambda_I \alpha_I}\right) \frac{Q_{It}}{Q_{Mt}} \end{aligned} \quad (27)$$

o rozwiązaniach:

$$\frac{Q_{It}}{Q_{Mt}} = \frac{\frac{r+\delta_M}{\lambda_M \alpha_M} - \frac{r+\delta_C}{\lambda_C \alpha_C} \frac{1-\gamma_M}{\gamma_C}}{1 - \frac{r+\delta_I}{\lambda_I \alpha_I} - \frac{r+\delta_C}{\lambda_C \alpha_C}}, \quad (28)$$

$$\frac{Q_{Ct}}{Q_{Mt}} = \frac{1-\gamma_M}{\gamma_C} - \frac{\gamma_I}{\gamma_C} \frac{\frac{r+\delta_M}{\lambda_M \alpha_M} - \frac{r+\delta_C}{\lambda_C \alpha_C} \frac{1-\gamma_M}{\gamma_C}}{1 - \frac{r+\delta_I}{\lambda_I \alpha_I} - \frac{r+\delta_C}{\lambda_C \alpha_C}}, \quad (29)$$

gdy spełniony jest warunek:

$$1 - \frac{r+\delta_I}{\lambda_I \alpha_I} - \frac{r+\delta_C}{\lambda_C \alpha_C} \neq 0.$$

Wzory (28) i (29) wskazują, że stopa wzrostu ma wpływ na strukturę kapitału i produkcji. Gdy w gospodarce dochodzi do przejścia od technologii wykorzystywanych w sektorach M , C i I , odpowiednio T_M , T_C i T_I na technologie odpowiednio T'_M , T'_C i T'_I , nowe proporcje rozwoju sektorów ustalone są przez odpowiednie rozwiązania (28) i (29) przy nowych parametrach technologicznych i stopie wzrostu r' :

$$\frac{Q_{It}}{Q_{Mt}} = \frac{\frac{r'+\delta'_M}{\lambda'_M \alpha'_M} - \frac{r'+\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C} \frac{1-\gamma'_M}{\gamma'_C}}{1 - \frac{r'+\delta'_I}{\lambda'_I \alpha'_I} - \frac{r'+\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C}}, \quad (30)$$

$$\frac{Q_{Ct}}{Q_{Mt}} = \frac{1-\gamma'_M}{\gamma'_C} - \frac{\gamma'_I}{\gamma'_C} \frac{\frac{r'+\delta'_M}{\lambda'_M \alpha'_M} - \frac{r'+\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C} \frac{1-\gamma'_M}{\gamma'_C}}{1 - \frac{r'+\delta'_I}{\lambda'_I \alpha'_I} - \frac{r'+\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C}}. \quad (31)$$

pod warunkiem:

$$1 - \frac{r' + \delta'_I}{\lambda'_I \alpha'_I} - \frac{r' + \delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C} \neq 0.$$

Warto zwrócić uwagę na fakt, że w pierwszym okresie wielkość emisji zanieczyszczeń wzrasta ze stopą r , a w okresie trzecim ze stopą r' . Można zatem mówić, że w okresach pierwszym i trzecim gospodarkę charakteryzuje wzrost zrównoważony, podczas gdy okres drugi jest czasem przemian strukturalnych.

W szczególnie interesującym przypadku, gdy wielkość produkcji jest ograniczona od góry przez limit emisji, stopa wzrostu przyjmuje wartość zero, a rozwiązania (30) i (31) postać:

$$\frac{Q'_I}{Q'_M} = \frac{\frac{\delta'_M}{\lambda'_M \alpha'_M} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C} \frac{1 - \gamma'_M}{\gamma'_C}}{1 - \frac{\delta'_I}{\lambda'_I \alpha'_I} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C}}, \quad (32)$$

$$\frac{Q'_C}{Q'_M} = \frac{1 - \gamma'_M}{\gamma'_C} \frac{\frac{\delta'_M}{\lambda'_M \alpha'_M} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C} \frac{1 - \gamma'_M}{\gamma'_C}}{1 - \frac{\delta'_I}{\lambda'_I \alpha'_I} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C}}, \quad (33)$$

przy czym gospodarka znajduje się w stanie ustalonym: wielkości kapitału, produkcji, inwestycji, konsumpcji i emisji zanieczyszczeń są stałe. Bezwzględna wielkość emisji E' w stanie ustalonym powstałym w trzecim okresie jest wyznaczana za pomocą wzoru:

$$\begin{aligned} E' &= \varepsilon'_M Q'_M + \varepsilon'_C Q'_C + \varepsilon'_I Q'_I \\ &= \varepsilon'_M Q'_M + \varepsilon'_C \left(\frac{1 - \gamma'_M}{\gamma'_C} - \frac{\gamma'_I}{\gamma'_C} \frac{\frac{\delta'_M}{\lambda'_M \alpha'_M} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C} \frac{1 - \gamma'_M}{\gamma'_C}}{1 - \frac{\delta'_I}{\lambda'_I \alpha'_I} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C}} \right) Q'_M + \varepsilon'_I \frac{\frac{\delta'_M}{\lambda'_M \alpha'_M} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C} \frac{1 - \gamma'_M}{\gamma'_C}}{1 - \frac{\delta'_I}{\lambda'_I \alpha'_I} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C}} Q'_M \\ &= Q'_M \left[\varepsilon'_M + \varepsilon'_C \frac{1 - \gamma'_M}{\gamma'_C} + \left(\varepsilon'_I - \varepsilon'_C \frac{\gamma'_I}{\gamma'_C} \right) \frac{\frac{\delta'_M}{\lambda'_M \alpha'_M} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C} \frac{1 - \gamma'_M}{\gamma'_C}}{1 - \frac{\delta'_I}{\lambda'_I \alpha'_I} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C}} \right]. \end{aligned} \quad (34)$$

Ze wzoru (34) wynika, że znajomość limitu emisji oraz parametrów technologii T_M , T_C i T_I pozwala na wyznaczenie wielkości produkcji Q'_M sektora M , a co za tym idzie, również Q'_C i Q'_I , produkcji odpowiednio sektorów C i I , zgodnie ze wzorem (35):

$$Q'_M = \frac{E'}{\varepsilon'_M + \varepsilon'_C \frac{1 - \gamma'_M}{\gamma'_C} + \left(\varepsilon'_I - \varepsilon'_C \frac{\gamma'_I}{\gamma'_C} \right) \frac{\frac{\delta'_M}{\lambda'_M \alpha'_M} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C} - \frac{1 - \gamma'_M}{\gamma'_C}}{1 - \frac{\delta'_I}{\lambda'_I \alpha'_I} - \frac{\delta'_C}{\lambda'_C \alpha'_C}}}. \quad (35)$$

Analiza zjawisk zachodzących w okresie drugim wymaga rachunku optymalizacyjnego i będzie przeprowadzona w odrębnym badaniu. Doświadczenie uzyskane przy analizie modelu jednosektorowego, Gadomski, Nahorski (2006, 2008), pozwala na pewne wnioski co do wyniku zadania optymalizacji. W przypadku modelu jednosektorowego wprowadzenie limitu emisji wymusiło natychmiastową rezygnację z technologii dotychczas stosowanej na rzecz technologii nowej, mniej emisjogennej, jakkolwiek bardziej kapitałochłonnej.

Długość okresu trwania procesu konwersji technologicznej można oszacować, przy przyjętych założeniach o zależności między kapitałem a inwestycjami (17) oraz wartościach współczynników deprecjacji δ_i , $i = M, C, I$. Ponieważ zależność (17) można interpretować jak model opóźnienia rozłożonego (o geometrycznym rozkładzie opóźnienia, tzw. model Koycka) ze średnim opóźnieniem równym $1/\delta_i$, to wiadomo, że po zaprzestaniu inwestowania w kapitał reprezentujący określoną technologię, w wyniku deprecjacji po czasie równym około $3/\delta_i$ pozostanie w przybliżeniu 5% kapitału, czyli zdolności produkcyjne zmaleją odpowiednio do około 5% wielkości wyjściowej. Zważywszy na to, że przeciętna wartość stopy deprecjacji w Polsce kształtuje się poniżej 5%, proces zanikania kapitału trwać będzie ok. 60 lat.

Z uwagi na to, że całość środków inwestycyjnych w sektorze jest przeznaczana na nową technologię, odpowiednio głębokiej zmianie ulega w tym czasie struktura technologiczna kapitału.

Istotnym czynnikiem, określającym czas trwania procesu konwersji jest dopływ środków zewnętrznych. W cytowanych analizach, Gadomski, Nahorski (2006, 2008), zakładano, że dzięki handlowi pozwoleniami na emisję, modelowana gospodarka niewykorzystująca w początkowym okresie limitów emisji, uzyskuje dodatkowe środki umożliwiające przeprowadzenie konwersji w krótszym czasie. W omawianym modelu opcja ta nie może być rozważana, ponieważ nie są uwzględniane sektory: rządowy i wymiany z zagranicą.

Innym sposobem przyspieszenia restrukturyzacji może być wycofywanie silniej emisjogennego kapitału. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że działanie to pociąga za sobą szybszą redukcję zdolności produkcyjnych, charakteryzujących się co prawda wyższą emisjogennością, jednakże wytwarzających dobra znajdujące odpowiednie zastosowanie. W tym przypadku konieczna jest analiza stopnia i struktury wykorzystania zdolności produkcyjnych w danym sektorze. Przyspieszone wyłączenie starego kapitału wydaje się celowe wtedy, gdy w sektorze jest nadmiar niewykorzystanych zdolności produkcyjnych. W sytuacji przeciwnej, tj., gdy pro-

dukcja danego sektora jest wąskim gardłem dla wzrostu pozostałych sektorów, przyspieszona redukcja wydaje się niecelowa.

Analiza długookresowa

Wniosek z analizy średniookresowej jest jednoznacznie pesymistyczny: ustalenie limitu emisji musi prowadzić do zerowego wzrostu. Wynik ten jest zgodny z określeniem teorii ekonomii jako „dismal science” (ponura nauka).

Jednakże wyniki uzyskane dla założeń średniookresowych nie muszą obowiązywać w warunkach analizy długookresowej, w której uwzględniane są czynniki trudne do uwzględnienia w średnim okresie: trudne do przewidzenia pojawianie się nowych efektywniejszych technologii, ewolucja istniejących technologii (postęp techniczny), pojawianie się korzyści skali.

Jeśliby łączne działanie powyższych czynników wyrażało się zmniejszaniem wartości współczynników emisyjności ε_i , $i = M, C, I$; w poszczególnych sektorach zgodnie ze wzorem:

$$\varepsilon_i(t) = \varepsilon_i(0) e^{-\mu_i t}, \quad i = M, C, I;$$

gdzie współczynniki μ_i oznaczają stopę spadku emisji, to przy niezmiennym limicie emisji powstawałyby, zgodnie ze wzorem (35), warunki do wzrostu produkcji.

Literatura

- Allen, R. G. D. (1975) *Teoria makroekonomiczna, ujęcie matematyczne*. PWN, Warszawa.
- Gadomski J., Nahorski Z. (2007a) Emission limits and technology change in a small economy. W: W. Welfe i P. Wdowiński, red., *Modelling economies in transition 2006*, AM-FET.
- Gadomski J., Nahorski Z. (2007b) Impact of the pollution emission limits on technological structure of production. A modelling approach. W: O. Hryniewicz, J. Studziński i M. Romaniuk, red., *Environmental informatics and systems research*. Vol. 1: Plenary and session papers - EnviroInfo 2007, Shaker Verlag, IBS PAN.
- Gadomski J., Nahorski Z. (2007c) The Kyoto protocol induced technological change. W: A. Gnauck, red., *Modellierung und simulation von oekosystemen*, Shaker Verlag, 2007.
- Gadomski J., Nahorski Z. (2008) Change Of Production Technology As An Effect Of Policy Of Limiting GHG Emission. A Modelling Approach. ECOMOD CONFERENCE 2008 BERLIN, http://www.ecomod.net/conferences/ecomod2008/ecomod2008_papers.htm.
- Gadomski J., Woroniecka I. et al. (1998) *A Dynamic Model of Polish Economy in Transition*, p. red. J. W. Owińskiego. Polish Operational and Systems Research Society, Warszawa.
- Lange, O. (1961) *Wstęp do ekonometrii*, wyd. drugie rozszerzone. PWN, Warszawa.