

PRACE NAUKOWE

Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu

RESEARCH PAPERS

of Wrocław University of Economics

Nr 452

Rozwój trwały i zrównoważony



Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu
Wrocław 2016

Redakcja wydawnicza: Elżbieta Kozuchowska
Redakcja techniczna i korekta: Barbara Łopusiewicz
Łamanie: Beata Mazur
Projekt okładki: Beata Dębska

Informacje o naborze artykułów i zasadach recenzowania
znajdują się na stronach internetowych
www.pracnaukowe.ue.wroc.pl
www.wydawnictwo.ue.wroc.pl

Publikacja udostępniona na licencji Creative Commons
Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 3.0 Polska
(CC BY-NC-ND 3.0 PL)



© Copyright by Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
Wrocław 2016

ISSN 1899-3192
e-ISSN 2392-0041

ISBN 978-83-7695-619-0

Wersja pierwotna: publikacja drukowana

Zamówienia na opublikowane prace należy składać na adres:
Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu
ul. Komandorska 118/120, 53-345 Wrocław
tel./fax 71 36 80 602; e-mail: econbook@ue.wroc.pl
www.ksiegarnia.ue.wroc.pl

Druk i oprawa: TOTEM

Spis treści

| | |
|------------|---|
| Wstęp..... | 7 |
|------------|---|

Część 1. Teoretyczne aspekty rozwoju trwałego i zrównoważonego

| | |
|---|----|
| Arnold Bernaciak: Aktualne trendy relacji gospodarka–środowisko w Polsce w układzie presja – stan – reakcja / Current trends of relationships between economy and environment in Poland in a pressure – state – response framework | 11 |
| Tadeusz Borys: O dwóch komplementarnych ujęciach nowego paradygmatu konsumpcji / About two complementary approaches of a new consumption paradigm | 22 |
| Andrzej Czyżewski, Piotr Kulyk: Kształtowanie rozwoju trwale zrównoważonego w ekonomii rolnej w optyce historycznej i współczesnej / Creating permanently sustainable development in agricultural economics in historical and modern perspective | 32 |
| Johannes (Joost) Platje: Efficiency, fragility and unsustainable development / Wydajność, kruchość i niezrównoważony rozwój | 46 |
| Łukasz Popławski, Bogusław Kaczmarczyk: Problemy zrównoważonego rozwoju – wycena przestrzeni publicznej / Problems of sustainable development – evaluation of public space | 58 |
| Agata Rudnicka: Nowe standardy zarządzania jakością i środowiskiem a zrównoważony rozwój przedsiębiorstwa / New quality and environmental management standards vs. sustainable development of a company | 65 |
| Ivan Telega, Maciej Malaczewski: Wzrost gospodarczy, zasoby naturalne oraz środowisko w świetle schumpeterowskiej teorii wzrostu / Economic growth, natural resources and environment in the light of Schumpeterian growth model | 74 |

Część 2. Globalny wymiar rozwoju zrównoważonego

| | |
|--|-----|
| Agnieszka Becla: Problemy ekologiczne a Milenijne Cele Rozwoju w świetle idei zrównoważonego rozwoju / Ecological problems and Millennium Development Goals in the light of the sustainable development idea..... | 93 |
| Adam Budnikowski: Wybrane tendencje gospodarki światowej w latach 1946–2016 / Chosen trends of the world economy in the years 1946–2016 | 106 |
| Stanisław Czaja: Czynniki niedostatecznej realizacji Milenijnych Celów Rozwoju – analiza globalna / Factors of the insufficient realization of Millennium Development Goals – global analysis | 115 |

| | |
|--|-----|
| Eugeniusz Kośmicki: Współczesna globalna sytuacja kryzysowa a możliwości zrównoważonego rozwoju / Contemporary global crisis vs. a possibility of sustainable development | 126 |
| Leon Olszewski, Barbara Olszewska: Geoekonomiczne aspekty polityki rozwoju zrównoważonego / Geoeconomic aspects of sustainable development policy | 137 |
| Bartosz Ziemblicki: Zrównoważony rozwój z perspektywy prawa międzynarodowego i europejskiego / Sustainable development from the perspective of international and European law | 149 |

Część 3. Problemy rozwoju zrównoważonego w ujęciu sektorowym i lokalnym

| | |
|--|-----|
| Hanna Adamska: Realizacja koncepcji zrównoważonego rozwoju na obszarach wiejskich – studium przypadku / Implementation of sustainable development concept on rural areas – case study | 165 |
| Anna Bernaciak: Zmiany świadczeń dostarczanych przez ekosystemy w następstwie procesów rewitalizacji w miastach / Changes of the ecosystem services in the process of revitalization in cities | 177 |
| Joanna Godlewska: Teoretyczne i praktyczne aspekty rozwoju zrównoważonej turystyki na obszarach przyrodniczo cennych / Theoretical and practical aspects of sustainable tourism development in precious natural areas . | 185 |
| Krzysztof Posłuszny: Wybrane metody analizy wpływu procesów fragmentacji na emisje środowiskowe / Chosen methods of analysis of fragmentation influence on the environmental emissions..... | 197 |
| Stanisław Korenik, Dorota Rynio, Alicja Zakrzewska-Półtorak: Miejski obszar funkcjonalny Wrocławia jako rdzeń województwa dolnośląskiego / Wrocław functional area as the core of the Lower Silesia Voivodeship..... | 207 |
| Paulina Legutko-Kobus: Zarządzanie dziedzictwem kulturowym jako element implementacji rozwoju zrównoważonego na poziomie lokalnym / Management of cultural heritage as implementation of sustainable development at the local level | 219 |
| Monika Paradowska: Wyzwania dotyczące współpracy interesariuszy na rzecz zrównoważonego rozwoju transportu w polskich miastach / Challenges for cooperation with stakeholders of sustainable transport in Polish cities | 229 |
| Przemysław Skulski: Miejsce przemysłu obronnego w gospodarce – wybrane problemy / The place of defence industry in economy – selected aspects..... | 242 |
| Marian Woźniak: Perspektywy i wyzwania turystyki w koncepcji zrównoważonego wykorzystania zasobów naturalnych / Perspectives and challenges of tourism in the concept of sustainable use of natural resources ... | 258 |

Wstęp

Pojęcie trwałości w gospodarowaniu pojawiało się już kilkaset lat temu. W 1713 r. posługiwał się nim H.C. Carlowitz w odniesieniu do gospodarki leśnej, a w XIX wieku G.P. Marsh w relacji do niekorzystnych skutków rozwoju gospodarczego. Termin „rozwój trwały i zrównoważony” (*sustainable development*) oficjalnie po raz pierwszy pojawił się podczas Konferencji Organizacji Narodów Zjednoczonych (ONZ) w Sztokholmie w 1972 r. Od tamtego czasu powstało wiele definicji tego procesu, a większość z nich nawiązuje do tej, którą przedstawiono w *Raporcie Komisji Brundtland „Nasza wspólna przyszłość”* w 1987 r. Według niej rozwój trwały i zrównoważony opiera się na zaspokajaniu potrzeb teraźniejszości bez ryzyka uniemożliwienia zaspokajania potrzeb przyszłych pokoleń.

Prawo przyszłych pokoleń do zaspokajania ich potrzeb rozwojowych implikuje potrzebę stworzenia określonych ram instytucjonalno-prawnych stymulujących zmiany działalności ekonomicznej i społecznej w kierunku ochrony zasobów środowiska. Polityka rozwoju zrównoważonego jest formułowana i wdrażana w skali globalnej, regionalnej, makroekonomicznej i lokalnej. Niniejsze opracowanie ma na celu wskazanie współczesnych trendów zmian jej podstaw teoretycznych, a także charakterystykę wybranych obszarów działań realizacyjnych.

Pierwsza część opracowania obejmuje teoretyczne, wielowymiarowe aspekty rozwoju trwałego i zrównoważonego. Zawiera odniesienia do nowego paradygmatu konsumpcji (jako jednego z podstawowych procesów gospodarczych), zmian relacji gospodarka-środowisko wraz ze sposobami ich identyfikacji, a także problemów nierównoważenia rozwoju. Opiszano również wkład teorii zrównoważonego rozwoju do ekonomii rolnej, a następnie elementy zastosowań owej teorii w wycenie przestrzeni publicznej i funkcjonowaniu przedsiębiorstwa.

Drugą część opracowania poświęcono prawnym, politycznym i praktycznym problemom rozwoju trwałego i zrównoważonego w wymiarze globalnym. Problemy te zaprezentowano zarówno w perspektywie historycznej, jak i współczesnej w odniesieniu do kryzysu ekonomicznego i wiodących inicjatyw międzynarodowej polityki rozwoju. Poruszono też aspekty geoekonomiczne.

Trzecią i ostatnią część poświęcono problematyce rozwoju zrównoważonego w ujęciu sektorowym i lokalnym. Koncepcje równoważenia rozwoju poszczególnych sektorów gospodarki czy obszarów funkcjonalnych wyrastają z szerszego nurtu myśli ekonomicznej. W tym sensie są częścią i swoistym rozwinięciem (lub uszczegółowieniem) teorii rozwoju zrównoważonego. W wymiarze sektorowym w niniejszym opracowaniu uwzględniono przemysł, rolnictwo, transport i turystykę z uwzględnieniem polityk regulujących te dziedziny życia gospodarczego. W ukła-

dzie terytorialnym odniesiono się do uwarunkowań rozwoju obszarów miejskich i terenów wiejskich.

Prezentowane artykuły stanowią wkład do dyskusji nad ewolucją teorii rozwoju zrównoważonego i możliwościami jej urzeczywistnienia w praktyce, nad uwarunkowaniami wdrażania działań formułowanych na szczeblu Unii Europejskiej oraz na poziomie państw członkowskich (w tym adresowanych do podmiotów w skali lokalnej). Dotyczy to zarówno polityk makroekonomicznych, jak i sektorowych – w tym polityki środowiskowej. Skuteczność i efektywność tych działań może być odpowiedzią na wiele współczesnych wyzwań gospodarczych, społecznych i politycznych.

Karol Kociszewski

Ivan Telega

Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie
e-mail: telegai@uek.krakow.pl

Maciej Malaczewski

Uniwersytet Łódzki
e-mail: mmalaczewski@uni.lodz.pl

WZROST GOSPODARCZY, ZASOBY NATURALNE ORAZ ŚRODOWISKO W ŚWIETLE SCHUMPETEROWSKIEJ TEORII WZROSTU

ECONOMIC GROWTH, NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT IN THE PERSPECTIVE OF SCHUMPETERIAN GROWTH MODEL

DOI: 10.15611/pn.2016.452.07

Streszczenie: Teoria wzrostu gospodarczego opisuje zachowania gospodarki w długim okresie, tym samym może być wykorzystana jako podstawa do analizy zagadnień trwałości. Dotychczasowe prace wskazują na kluczową rolę postępu technicznego dla podtrzymania wzrostu w warunkach ograniczonych zasobów. Ze tego względu właściwa wydaje się być analiza klasy modeli endogenicznych, w których tempo postępu technicznego jest określone wewnątrz modelu. Celem pracy jest przedstawienie podstawowych założeń schumpeterowskiego modelu wzrostu gospodarczego oraz próba wykorzystania modelu analizy wybranych zagadnień teorii wzrostu, tj. zdolności do utrzymania wzrostu w warunkach ograniczonych zasobów naturalnych oraz emisji zanieczyszczeń. W części 1 omówiono założenia podstawowego modelu wzrostu. Część 2 jest poświęcony ocenie wpływu ograniczoności zasobów naturalnych na długookresową stopę wzrostu, jak również określeniu poprawy jakości środowiska naturalnego przy utrzymaniu wzrostu gospodarki. W części 3 postawiono problem dynamicznej optymalizacji schumpeterowskiego modelu wzrostu z uwzględnieniem w funkcji użyteczności oraz zasobów naturalnych w funkcji produkcji. Wskazano również na pewne problemy wynikające z przyjmowanych założeń.

Słowa kluczowe: trwałość, modele wzrostu gospodarczego, zasoby naturalne.

Summary: Economic growth theory describes the behavior of the economy in the long run, and therefore it can be used as a tool for the analysis of sustainability issues. Previous works show the key role of technical progress in sustaining growth with the constraint of natural resources. Therefore, the most promising are endogenous models in which the rate of technological progress is determined within the model. The goal of the study is to review the basic assumptions of Schumpeterian growth model and to use it as a framework for the analysis of selected sustainability issues, i.e. the ability of the economy to sustain growth

under resource constraint and the relation between growth and the level of environmental pollution. Section I discusses the basic assumptions of the model. Section 2 discusses the impact of natural resources scarcity on the long-term growth rate, as well as the conditions for improving the environment while maintaining economic growth. In section 3 we put the problem of dynamic optimization taking into account the state of the environment in the utility function and the natural resources in the production function. Some remarks about the difficulties arising from the model assumptions are added at the end.

Keywords: sustainability, models of economic growth, natural resources.

1. Wstęp

Problematyka trwałości rozwoju społeczno-gospodarczego (*sustainability*), w tym również utrzymania długookresowego wzrostu gospodarczego oraz stosunkowo nowa koncepcja kapitału naturalnego, są głównym przedmiotem badań tzw. ekonomii ekologicznej. W ekonomii głównego nurtu natomiast zagadnienia te są najczęściej rozważane oddzielnie od teorii podstawowej.

Teoria wzrostu gospodarczego opisuje zachowanie gospodarki w długim okresie, tym samym naturalne wydaje się poszukiwanie możliwości wprowadzenia do niej zagadnień związanych zasobami naturalnymi, emisją zanieczyszczeń etc. Dotychczasowe prace wskazują na kluczową rolę postępu technicznego dla podtrzymania wzrostu w warunkach ograniczonych zasobów – por. [Malczewski 2013] oraz [Telega 2012, s. 2]. Wnioski te są zgodne z klasycznymi już pracami Solowa [1974], a w szczególności Stigliza [1974], powstałymi w odpowiedzi na publikację „Granice wzrostu” w 1972 roku¹. Nowsze publikacje również wskazują na znaczenie postępu technologicznego jako głównego czynnika zwiększenia (lub przynajmniej utrzymania) produkcji w warunkach rosnącej rzadkości zasobów [Smulders 2005].

Zauważamy, że zgodnie z teorią neoklasyczną postęp jest jedynym źródłem wzrostu w długim okresie, nawet bez uwzględnienia ograniczającej roli zasobów naturalnych². Zaletą schumpeterowskiej teorii wzrostu jest to, że próbuje ona wyjaśnić proces postępu technicznego w postaci innowacji, przy uwzględnieniu uwarunkowań mikroekonomicznych oraz instytucjonalnych. Zauważa się, że nowe modele pozwalają uniknąć rozróżnienia pomiędzy wzrostem a rozwojem gospodarczym, jednocześnie dostarczając narzędzi analitycznych do skutecznego projektowania strategii oraz instytucji pozwalających osiągnąć trwały wzrost gospodarczy [Aghion 2004, s. 2].

Celem pracy jest przedstawienie podstawowych założeń schumpeterowskiego modelu wzrostu gospodarczego oraz próba wykorzystania modelu do analizy wybranych zagadnień trwałości wzrostu, tj. zdolności do utrzymania wzrostu w warun-

¹ Przegląd publikacji z lat 1974–2000 poświęconych problematyce trwałości wzrostu można znaleźć w [Pezzey, Toman 2002].

² Wynika to z założeń o malejącej produktywności kapitału.

kach ograniczoności zasobów naturalnych oraz emisji zanieczyszczeń. W kontekście przedstawionego modelu wzrostu, zagadnienia trwałości, tj. problematyka zasobów naturalnych oraz emitowanych zanieczyszczeń, mogą być analizowane na dwa sposoby. Przy założeniu stałej stopy oszczędności możemy zbudować rozszerzony model, w którym zasoby naturalne są uwzględnione w funkcji produkcji (na wzór tzw. zielonego modelu Solowa [Brock, Taylor 2010]) oraz próbować określić warunki malejącej emisji. Drugi sposób polega na optymalizacji typu Ramseya (perspektywa społecznego planisty) oraz odpowiedzi na pytanie o istnienie optymalnej ścieżki wzrostu przy pewnych założeniach co do roli zasobów naturalnych w funkcji produkcji, jak również wpływu zanieczyszczeń na całkowitą użyteczność typowego przedstawiciela.

2. Założenia podstawowego modelu

W neoklasycznej teorii wzrostu malejąca krańcowa produktywność kapitału (malejące przychody z akumulacji kapitału) powoduje, że w długim okresie jedynym źródłem wzrostu gospodarczego jest postęp techniczny. W teorii neoklasycznej postęp techniczny jest przeważnie traktowany jako egzogeniczny, tym samym zdolność do utrzymania wzrostu w długim okresie wynika z przyjętych założeń. W ramach schumpeterowskiej teorii wzrostu (dalej: STW), zaliczanej do endogenicznych teorii wzrostu, akumulacja kapitału oraz postęp techniczny są traktowane jako czynniki komplementarne, wspólnie determinujące poziom produkcji oraz tempo wzrostu. Tak jak akumulacja kapitału *per capita* nie może być bez postępu technicznego ze względu na malejące przychody krańcowe, tak samo postęp techniczny nie jest możliwy bez kapitału wykorzystywanego w procesie badawczo-rozwojowym w sektorze B+R, którego skutkiem są innowacje zwiększające produktywność. Podstawowe idee STW są następujące [Aghion 2004, s. 9]:

1. Wzrost jest przede wszystkim napędzany przez innowacje w formie nowych produktów, technik, metod organizacji etc.

2. Innowacje powstają w wyniku działalności podmiotów gospodarczych inwestujących w B+R.

3. Zachęty do inwestowania w działalność B+R są determinowane przez otoczenie ekonomiczne oraz instytucjonalne³.

Długookresowa stopa wzrostu (*steady-state growth rate*) zależy tym samym również od czynników sprzyjających akumulacji kapitału (np. stopy subsydiów). Zwiększenie zasobu kapitału powoduje efekt skali – większy dochód narodowy oznacza większy popyt na innowacyjne produkty, a tym samym zyski oraz zachętę

³ Na przykład Howitt i Aghion [1999] twierdzą, że brak ochrony własności intelektualnej zwiększa możliwości imitacji, tym samym zmniejsza zachętę do podejmowania działalności rozwojowej. Wysoka stopa procentowa, będąca jednym z efektów makroekonomicznej stabilności, zmniejsza wartość bieżącą zysków skutecznego innowatora, tym samym również zmniejsza zachętę do inwestowania w R&D. Oczywiście czynników tych jest więcej.

do podejmowania działalności w zakresie badań i rozwoju. Po drugie, większy zasób kapitału obniża stopę procentową, a tym samym koszt pozyskania kapitału na działalność rozwojową [Howitt, Aghion 1998].

Rozważamy zamkniętą gospodarkę⁴, w której produkuje się dobro finalne wykorzystywane zarówno w konsumpcji, jak i w procesie produkcji nakładów pośrednich (*intermediate inputs*). Dobro finalne jest produkowane z wykorzystaniem pracy⁵ oraz *continuum* nakładów pośrednich indeksowanych na odcinku [0, 1] zgodnie z funkcją produkcji:

$$Y = C + I + N = L^{1-\alpha} \int_0^1 A_i x_i^\alpha di = \int_0^1 Y_i di, \quad (1)$$

$$Y_i = A_i x_i^\alpha L^{1-\alpha}, \quad (2)$$

gdzie L to siła robocza, x_i to ilość nakładów pośrednich typu i , A_i to parametr produktywności mierzący jakość nakładu i ⁶. Wytworzony produkt jest dzielony na konsumpcję, inwestycje oraz nakłady na działalność badawczo-rozwojową N . Każdy nakład pośredni jest produkowany przez monopolistę z wykorzystaniem kapitału zgodnie z formułą:

$$x_i = \frac{K_i}{A_i}, \quad (3)$$

gdzie K_i jest nakładem kapitału w sektorze i . Dzielenie poprzez A_i odzwierciedla fakt, że produkcja lepszych jakościowo nakładów pośrednich wymaga coraz większych nakładów kapitału⁷.

Koszt kapitału $\zeta = r + \delta$, gdzie r jest stopą procentową, a δ – stopą amortyzacji. Tym samym średni koszt kapitału na jednostkę wytworzonego nakładu pośredniego jest równy $\frac{K_i \zeta}{x_i} = \frac{x_i A_i \zeta}{x_i} = A_i \zeta$. Maksymalizując zysk, każdy z producentów – monopolistów w każdym sektorze ustali wielkość produkcji na poziomie⁸:

⁴ Model jest przedstawiany za [Howitt, Aghion 1999].

⁵ Dla ułatwienia, w dalszej niniejszej części zakładamy, że L jest tożsamościowo równe 1 i stałe w czasie.

⁶ Wszelkie analizowane zmienne są oczywiście różniczkowalnymi funkcjami czasu. Dla uproszczenia notacji pomijamy jednak w zapisie subskrypt czasu t .

⁷ Zauważa się, że możliwe jest przyjęcie w tym przypadku funkcji Cobba-Douglasa, ale nie prowadzi to do jakościowo innych wniosków.

⁸ Cena pi pojedynczego dobra kapitałowego z sektora i równa się produktowi krańcowemu: $p_i = L^{1-\alpha} A_i \alpha x_i^{\alpha-1}$. Zysk wynosi zatem $\Pi_i = p_i x_i - A_i \zeta x_i = L^{1-\alpha} A_i \alpha x_i^\alpha - A_i \zeta x_i$. Maksymalizując zysk Π_i względem x_i otrzymujemy, że $x_i^{\alpha-1} = \frac{\zeta}{\alpha} L^{\alpha-1}$. Podstawiając uzyskany wynik do wzoru na Π_i , otrzymujemy $\Pi_i = A_i x_i (\frac{\zeta}{\alpha} - \zeta)$. Można też pokazać, że zysk jest równy $1-\alpha$ części przychodu: $\frac{\Pi_i}{L^{1-\alpha} A_i \alpha x_i^\alpha} = \frac{A_i x_i (\frac{\zeta}{\alpha} - \zeta)}{L^{1-\alpha} A_i \alpha x_i^\alpha} = (\frac{\zeta}{\alpha} - \zeta) \frac{1}{L^{1-\alpha} \alpha} x_i^{1-\alpha}$. Podstawiając zamiast $x_i^{1-\alpha}$ wyrażenie $\frac{\alpha^2}{\zeta} L^{1-\alpha}$, uzyskujemy $\frac{\Pi_i}{L^{1-\alpha} A_i \alpha x_i^\alpha} = 1 - \alpha$.

$$x_i = x = \left(\frac{\xi}{\alpha^2}\right)^{\frac{1}{\alpha-1}} L. \quad (4)$$

Oznaczamy przeciętną produktywność jako $A = \int_0^1 A_i di$. Równowaga na rynku kapitału wymaga, by spełniony był warunek $K = \int_0^1 A_i x_i di$. Ponieważ każdy z sektorów produkuje taką samą ilość dobra pośredniego x , to

$$x = k = \frac{K}{A}, \quad (5)$$

gdzie k jest wskaźnikiem kapitałochłonności (*capital intensity*). Stąd i z równania (4) otrzymujemy

$$\xi = r + \delta = \alpha^2 (k/L)^{\alpha-1}. \quad (6)$$

Zauważamy, że o ile stopa amortyzacji jest stałą, stopa procentowa r jest zmienną endogeniczną – zgodnie z powyższym równaniem, wzrost kapitałochłonności powoduje spadek stopy procentowej, z tym samym spadkiem kosztu kapitału.

Podstawiając (5) do funkcji produkcji, otrzymujemy:

$$Y = K^\alpha (AL)^{1-\alpha}, \quad (7)$$

czyli klasyczną postać funkcji produkcji Cobba-Douglasa. Wielkość produkcji zależy zatem od zasobu kapitału oraz zasobu wiedzy⁹. Stopa wzrostu Y jest określona przez czynniki determinujące poziom inwestycji (wzrost zasobu kapitału) oraz innowacji (wzrost zasobu wiedzy). Dynamika zasobu kapitału jest określona podobnie jak w modelu wzrostu Solowa ze stałą stopą oszczędności s , tj.

$$\frac{\dot{K}}{K} = \frac{1}{K} (sY - \delta K) s(k/L)^{\alpha-1} - \delta. \quad (8)$$

W ramach schumpeterowskiej teorii wzrostu przyjmuje się, że innowacje powstają na skutek działań podejmowanych w poszczególnych sektorach, przy czym zakłada się, że prowadzenie działalności badawczo-rozwojowej wymaga nakładów kapitałowych. Im wyższy jest poziom technologii w gospodarce, tym większe nakłady są potrzebne, by częstotliwość pojawiania się innowacji pozostała na tym samym poziomie. Ilość powstających innowacji w każdym z sektorów jest losowa, w modelu przyjmuje się, że ma ona rozkład Poissona z parametrem λn_i , λ jest parametrem opisującym wydajność krajowego sektora B+R, natomiast n oznacza ilość nakładów (dobra finalnego) na badania i rozwój w każdym z sektorów skorygowaną o poziom technologii, tzn. nakłady podzielone przez maksymalną produktywność (*leading-edge technology*) $A_{max} \equiv \max A_i, i \in [0,1]$:

$$n_i = \frac{N_i}{A_{max}}. \quad (9)$$

⁹ Przypominamy, że założyliśmy, iż L jest stałe.

Ponieważ oczekiwany przychód z dodatkowej innowacji (por. [Howitt, Aghion 1999, s. 88]) jest jednakowy dla wszystkich sektorów, zatem n_i także jest identyczne dla wszystkich sektorów, $n_i = n$. Oznacza to również, że $N_i = N^*$ jest jednakowe dla każdego sektora, oraz $N = \int_0^1 N^* di = N^*$. Tym samym $n = \frac{N}{A_{max}}$. Pomimo że innowacje powstają w różnych sektorach, można udowodnić, że tempo wzrostu produktywności w każdym sektorze (które jest wynikiem kolejnych innowacji) jest jednakowe i równe tempu wzrostu maksymalnej produktywności¹⁰. Przyjmuje się, że każda innowacja zwiększa maksymalną produktywność ze stopą $\sigma > 0$. Tym samym stopa wzrostu A_{max} oraz postępu technologicznego A (przeciętna produktywność) jest określona następująco:

$$\frac{\dot{A}_{max}}{A_{max}} = \frac{\dot{A}}{A} = \lambda n \sigma. \quad (10)$$

Wartość innowacji V w chwili t jest dana wzorem ($x = k$):

$$V = \int_t^\infty e^{-\int_t^s r_u + \lambda n_u du} (1 - \alpha) L^{1-\alpha} A_{max} \alpha k^\alpha ds, \quad (11)$$

gdzie $e^{-\int_t^s r_u du}$ jest czynnikiem dyskontującym strumień zysku, natomiast $e^{-\int_t^s \lambda n_u du}$ jest prawdopodobieństwem, że monopolista nie zostanie zastąpiony przez następnego innowatora do chwili s ¹¹. Określamy zmienną $v \equiv \frac{V}{L^{1-\alpha} A_{max}}$. Różniczkując v po czasie otrzymamy różniczkowe postaci (por. załącznik 1):

$$\dot{v} = (r_t + \lambda n_t)v - (1 - \alpha)\alpha k^\alpha. \quad (12)$$

Wielkość nakładów B+R w każdym z sektorów jest wyznaczona przez zrównanie się krańcowego kosztu z krańcową korzyścią z innowacji (tzw. *research arbitrage*). Krańcowy koszt zwiększenia $n = \frac{N}{A_{max}}$ o jednostkę jest równy¹² A_{max} , natomiast krańcowa korzyść jest równa λV ¹³. Tym samym otrzymujemy warunek

$$A_{max} = \lambda V. \quad (13)$$

¹⁰ Wynika to ze stałości, z dokładnością do przenumerowania sektorów, parametrów rozkładu produktywności po poszczególnych sektorach. Więcej na ten temat czytelnik znajdzie w pracy [Howitt, Aghion 1999, s. 88–89, 115].

¹¹ Zauważmy, że wartość innowacji V wprowadzonej w chwili t jest wartością oczekiwaną wartości bieżącej strumienia zysku od chwili t do nieskończoności.

¹² Ponieważ $n = N/A_{max}$, czyli $N = nA_{max}$, dostajemy $\frac{dN}{dn} = A_{max}$, z zatem przyrost n o jednostkę wymaga zwiększenia nakładów N o A_{max} .

¹³ Zwiększenie n o jednostkę oznacza zwiększenie parametru λn w rozkładzie Poissona o λ , tzn. wzrost n o jednostkę zwiększa ilość powstających innowacji o λ .

Oznacza to, że $v = 1/\lambda L^{1-\alpha}$, a zatem v jest stałe. Zatem $\dot{v} = 0$, dzięki czemu z równań (12) oraz (6) otrzymujemy:

$$1 = \lambda \frac{(1-\alpha)\alpha L^{1-\alpha} k_t^\alpha}{r + \lambda n_t} = \lambda \frac{(1-\alpha)\alpha L^{1-\alpha} k_t^\alpha}{\alpha^2 (k_t/L)^{1-\alpha} - \delta + \lambda n_t}, \quad (14)$$

który jest spełniony również *steady-state*. Warunek ten oznacza, że dla każdej chwili t wielkość nakładów n na B+R zależy od poziomu kapitałochłonności k ; wzrost k powoduje wzrost n .

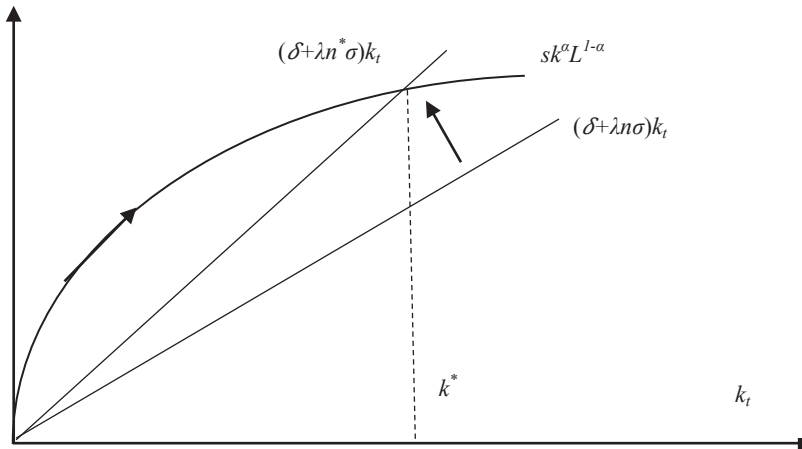
Dynamika k jest opisana równaniem Solowa¹⁴

$$\frac{\dot{k}}{k} = s(k/L)^{\alpha-1} - \delta - \lambda n\sigma. \quad (15)$$

Dynamika modelu jest również podobna, jedyna różnica polega na tym, że stopa postępu technicznego jest zależna od k . W miarę wzrostu k maleje stopa procentowa r oraz koszt kapitału, co powoduje zintensyfikowanie działalności B+R – wzrost n oraz $\delta + \lambda n\sigma$ – por. rys. 1.

Oznacza to, że k szybciej osiągnie k^* , tj. punkt równowagi (*steady-state*). Poza ścieżką zrównoważonego wzrostu, tempo wzrostu produkcji jest średnią ważoną stopy wzrostu kapitału oraz stopy postępu technicznego:

$$g_Y = \alpha(s(k/L)^{\alpha-1} - \delta) + (1-\alpha)\lambda n\sigma. \quad (16)$$



Rys. 1. Równowaga długookresowa modelu

Źródło: opracowanie własne.

¹⁴ Zwrócić należy uwagę, że w tej sytuacji $k=K/A$, co w sytuacji L tożsamościowo równego 1 i stałego w czasie jest tożsama z oznaczeniem k w modelu Solowa z postępowem technicznym w sensie Harroda, por. np. [Tokarski 2011].

Natomiast w stanie równowagi k oraz n (co wynika z (14)) są stałe. Kapitał fizyczny rośnie zatem w identycznym tempie $g = \lambda n^* \sigma$. Podobnie jak w klasycznym modelu Solowa, w długim okresie jedynym źródłem wzrostu jest postęp techniczny. Ponieważ liczba sektorów, w których powstają innowacje, jest nieskończona, to zgodnie z prawem wielkich liczb λn (wartość oczekiwana ilości innowacji w każdym z sektorów) może być traktowana jako stała.

3. Zasoby naturalne oraz emisje zanieczyszczeń w modelu schumpeterowskim

Przy założeniu stałej stopy oszczędności s możemy zbudować rozszerzony model, w którym zasoby naturalne są uwzględnione w funkcji produkcji (na wzór tzw. zielonego modelu Solowa [Brock, Taylor 2010]) oraz próbować określić ich wpływ na dynamikę produkcji i spełnienie warunków malejącej emisji.

Niech R oznacza strumień zasobów wykorzystywany w produkcji, natomiast S jest całkowitym dostępnym zasobem. Oczywiście $\dot{S} = -R$. Dane empiryczne dotyczące materiałochłonności rozwiniętych gospodarek wskazują, że wraz ze wzrostem produkcji następuje wzrost całkowitego zapotrzebowania materiałowego [Bringezu 2004; Meyer 2011]. Ponieważ celem modelu jest określenie wpływu wyczerpywania się zasobów na długookresowy wzrost, można przyjąć upraszczające założenie o okresowym zmniejszaniu się ilości dostępnych zasobów (m.in. na skutek egzogenicznych szoków)¹⁵. Inaczej mówiąc, R jest okresami stałe i zmienne na skutek egzogenicznych oddziaływań. Zmodyfikowana funkcja produkcji jest dana wzorem:

$$Y = L^\beta R^\nu \int_0^1 A_i x_i^\alpha di = L^\beta R^\nu K^\alpha A^{1-\alpha}, \quad (17)$$

gdzie $\alpha + \beta + \nu = 1$, tj. funkcja jest jednorodna stopnia pierwszego przy ustalonym poziomie technologii. Jednocześnie możemy przyjąć założenie, że wielkość emisji zanieczyszczeń jest proporcjonalna do wielkości wytworzonego produktu, tj. $E = \Omega Y$, gdzie Ω jest współczynnikiem wyrażającym ilość emisji na jednostkę produkcji. Wielkość emisji na jednostkę produkcji maleje na skutek wdrażania coraz „czystszych” technologii. Załóżmy, że Ω maleje ze stopą proporcjonalną do ogólnej stopy postępu technicznego, tj.

$$\frac{\dot{\Omega}}{\Omega} = -\omega \lambda n \sigma, \quad (18)$$

gdzie $\omega > 0$ ¹⁶. Jednocześnie zwiększenie się parametru λ (efektywność krajowego B+R) albo σ („wielkość” innowacji) oznacza również szybszy spadek emisyjności krajowej produkcji, a tym samym stwarza warunki do zmniejszania emisji całkowitej.

¹⁵ Przyjęcie założenia o tym, że R maleje w sposób ciągły z pewną stałą stopą, znacznie utrudnia analizę modelu. Przede wszystkim nie jest pewne, czy model osiągnie stan stacjonarny. Warto także zauważyć, że ciągły spadek ilości dostępnych surowców jest mało realistycznym założeniem w świetle danych empirycznych.

¹⁶ Można zinterpretować to w sposób taki, że spadek emisyjności jest skutkiem ubocznym wdrażania innowacji zwiększających produktywność.

Zanieczyszczenia P są kumulowane w środowisku naturalnym, powodując straty ekologiczne oraz bezpośrednio wpływając na dobrobyt ludności. W literaturze przedmiotu proponuje się następujące ujęcie dynamiki skumulowanej ilości zanieczyszczeń [Xepapadeas 2005, s. 1223]:

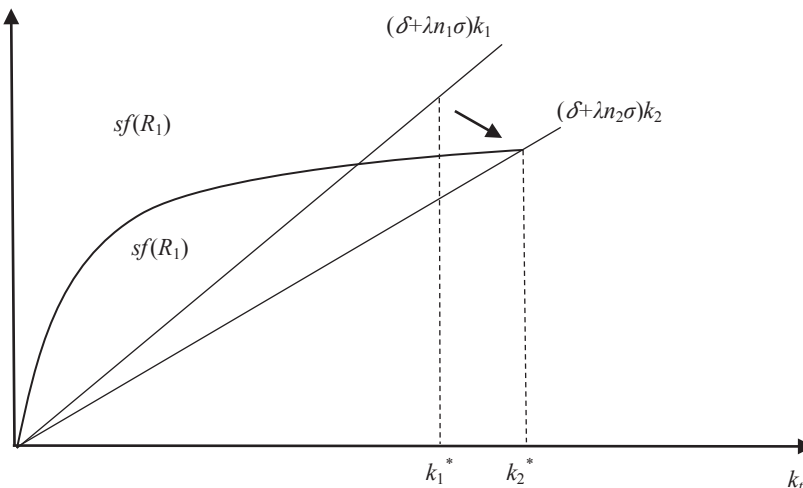
$$\dot{P} = E - mP, \quad (19)$$

gdzie m oznacza naturalny proces asymilacji zanieczyszczeń w środowisku naturalnym.

Gdy gospodarka znajduje się w *steady-state*, równowaga pomiędzy kapitałochłonnością k a wielkością nakładów na B+R n jest dana równaniem (dla uproszczenia notacji przyjmujemy $L=I$):

$$1 = \lambda \frac{(1-\alpha)\alpha k^\alpha R^\nu}{\alpha^2 k^{\alpha-1} R^\nu - \delta + \lambda n} = \lambda \frac{(1-\alpha)\alpha k^\alpha R^\nu}{r + \lambda n}, \quad (20)$$

które jest analogiczne do równania (14). Jeżeli teraz na skutek zewnętrznego szoku oddziałującego na gospodarkę znajdującą się w stanie równowagi spada ilość dostępnych zasobów naturalnych, tzn. maleje R , następuje proces dostosowania oraz nowego poziomu *steady-state*. Spadek R powoduje spadek łącznej wielkości produkcji, co przy stałej stopie oszczędności oznacza również spadek inwestycji brutto i zmniejszenie kapitałochłonności k . Jednocześnie zmniejszenie kapitałochłonności prowadzi do wzrostu stopy procentowej oraz zmniejszenia nakładów na B+R n – następuje przesunięcie krzywej $(\delta + \lambda n\sigma)k$ w dół poprzez zmniejszenie się jej nachylenia. Gospodarka zaczyna następnie zmierzać do nowego punktu równowagi. Ostatecznie osiąga nowy punkt równowagi przy niższym poziomie nakładów na B+R



Rys. 2. Proces dostosowań po szoku zasobowym – nowy stan równowagi modelu

Źródło: opracowanie własne.

oraz innej, niekoniecznie niższej kapitałochłonności (zależy od względnego przemieszczania się obu krzywych). Oznacza to spowolnienie długookresowego wzrostu z $g_1 = \lambda n_1 \sigma$ do $g_2 = \lambda n_2 \sigma$ (por. rys. 2). Potencjalne spowolnienie spowodowane zmniejszeniem dostępność zasobów naturalnych może być zrekomensowane wzrostem wartości parametrów krajowego sektora B+R, tj. λ oraz σ . Dokładny opis zachowania się gospodarki w warunkach zmniejszenia ilości dostępnych zasobów wymaga określenia parametrów modelu oraz przeprowadzenia symulacji.

Rozważmy teraz sytuację, w której w procesie produkcyjnym zużywana jest coraz mniejsza ilość zasobów naturalnych. Załóżmy, dla ustalenia uwagi, że strumień zużywanych w procesie produkcyjnym zasobów naturalnych R zmienia się w czasie ze stałą stopą¹⁷ $g_R < 0$. Jeżeli zatem R nieustająco zmienia się (maleje) wraz z upływem czasu, to opisany powyżej mechanizm dostosowań ma miejsce w każdej chwili. Następują zatem ciągłe przesunięcia obu krzywych. Krzywa inwestycji przesuwa się w dół, gdyż przy założeniu pozostałych czynników niezmiennych, zmniejszająca się ilość zasobów naturalnych powoduje zmniejszenie się wielkości produkcji, a zatem także inwestycji (które stanowią stałą część produktu). Krzywa deprecjacji kapitałochłonności także przesuwa się w dół, zmniejszając swoje nachylenie. Jest to spowodowane występowaniem zależności (20), na mocy której wraz ze zmniejszeniem się strumieni zużywanych zasobów naturalnych spada wielkość nakładów na innowacje n . Wzajemne przesunięcie się obu krzywych powoduje ustalenie się nowego punktu równowagi długookresowej, który jednak nie zmienia swojego przyciągającego charakteru. Gospodarka, która wcześniej zmierzała do poprzedniego stanu równowagi, teraz zmierza w kierunku nowego, bez względu na to, czy wcześniej zdołała osiągnąć poprzedni *steady-state*, czy nie zdołała się w nim znaleźć. Ponieważ proces zmniejszenia się strumieni zasobów naturalnych postępuje ciągle, to obie krzywe bezustannie przesuwały się, tworząc tym samym nowe punkty równowagi. Aby osiągnąć ścieżkę kształtowania się kapitałochłonności w takim przypadku, należałoby rozwiązać równanie różniczkowe (15) z uwzględnieniem występowania w funkcji produkcji strumienia zasobów naturalnych R , dodatkowo biorąc pod uwagę równanie (20), co spowoduje, że równanie jest równaniem różniczkowym pierwszego rzędu nieliniowym. Możliwe jest jedynie numeryczne jego rozwiązanie, co nie jest jednak celem niniejszej pracy.

Jak zauważono wyżej, całkowita emisja zanieczyszczeń może wzrastać lub maleć, co jest uzależnione od relacji stopy długookresowego wzrostu i stopy spadku emisyjności. Zauważamy, że jeżeli $\omega > 1$, to emisyjność maleje szybciej, niż wynosi tempo wzrostu gospodarczego, a tym samym maleje całkowita ilość emitowanych zanieczyszczeń. Skumulowana ilość zanieczyszczeń P maleje wtedy, gdy

$$\dot{P} < 0 \Leftrightarrow \frac{E}{P} < m.$$

¹⁷ Jest to standardowy wynik uzyskiwany w modelach wzrostu gospodarczego z zasobami naturalnymi w przypadku przyjęcia funkcji typu Cobba-Douglasa, gdzie zasoby naturalne są substytucyjne do pozostałych czynników produkcji, por. [Malczewski 2013].

Oznacza to, że poprawa stanu środowiska naturalnego nastąpi wtedy, gdy iloraz emisji zanieczyszczeń i jej skumulowanej ilości będzie mniejszy niż stopa naturalnej asymilacji zanieczyszczeń. Zahamowanie wzrostu na skutek ograniczenia w dostępie do zasobów naturalnych może być dodatkowym czynnikiem sprzyjającym zmniejszeniu emisji zanieczyszczeń (pod warunkiem relatywnie szybkiej poprawy wskaźnika emisyjności – zmniejszenia parametru Ω), a tym samym poprawy stanu środowiska naturalnego. Wniosek ten jest podobny do wniosków Zielonego modelu Solowa rozszerzonego o zasoby naturalne [Telega 2012, s. 29].

Zauważamy, że dla gospodarki znajdującej się w *steady-state* zachodzi:

$$E = \Omega L^\beta R^\nu k^\alpha A, \quad (21)$$

gdzie, na mocy (18), mamy że $\Omega = \Omega_0 \cdot e^{-\omega \lambda n \sigma t}$. Równanie (19) przyjmuje postać¹⁸:

$$\dot{P} = D \cdot e^{(1-\omega)\lambda n \sigma t} - mP, \quad (22)$$

gdzie $D = \Omega_0 R^\nu k^\alpha A_0$ jest stałą. Równanie (22) jest równaniem różniczkowym zwyczajnym liniowym pierwszego rzędu niejednorodnym, a jego rozwiązanie dane jest wzorem:

$$P = P_0 e^{-mt} + \frac{D}{(1-\omega)\lambda n \sigma + m} (e^{(1-\omega)\lambda n \sigma t} - e^{-mt}) \quad (23)$$

gdzie P_0 odzwierciedla stan środowiska w momencie 0. Znając wartość parametrów danej gospodarki, można, wykorzystując równanie (23), wyznaczyć ścieżkę opisującą zmianę stanu środowiska w czasie. Nietrudno zauważyć, że jest ona zależna od relacji wykładników potęg eksponentów, a zatem $(1-\omega)\lambda n \sigma$ oraz wartości parametru m opisującego naturalną zdolność ekosystemu do samooczyszczania się. Zauważamy, że:

- Jeżeli $\omega < 1$, to docelowo, z $t \rightarrow +\infty$, stopień zanieczyszczenia środowiska rosnąć będzie również do nieskończoności.
- Jeżeli $\omega > 1$, zatem stopa spadku emisyjności będzie większa od jedności, to tempo wzrostu zanieczyszczenia będzie niższe niż tempo ich oczyszczania. W $+\infty$ oznacza to całkowity brak zanieczyszczenia środowiska.
- Jeżeli $\omega = 1$, a zatem stopa spadku emisyjności będzie dokładnie równa stopie wzrostu emisji zanieczyszczeń, wówczas w nieskończoności poziom zanieczyszczenia środowiska będzie równy dokładnie $\lim_{t \rightarrow +\infty} P = \frac{D}{m} = \frac{\Omega_0 R^\nu k^\alpha A_0}{m}$

i zależność będzie m.in. od wielkości strumienia zużywanych i spalanych w procesie zasobów naturalnych.

Zauważmy też, że w przypadku gdy stopa postępu technicznego jest równa zero (a zatem $\lambda n \sigma = 0$), to również stopień zanieczyszczenia środowiska jest docelowo równy $\frac{D}{m}$, niezależnie od wartości parametru ω . Równanie (23) może być przedmiotem empirycznej oceny.

¹⁸ Pamiętajmy, że $L=1$ oraz że w *steady-state* R i k są stałe, a A zmienia się w tempie $\lambda n \sigma$, czyli $A = A_0 \cdot e^{\lambda n \sigma t}$.

4. Analiza modelu przy założeniu optymalizacji typu Ramseya

Innym, często stosowanym w literaturze teorii wzrostu gospodarczego podejściem do analizowania dynamiki modelu jest użycie narzędzi dynamicznej optymalizacji, gdzie zakładamy, że stopa oszczędności nie jest stała w czasie. Ponieważ zanieczyszczenie środowiska wywiera negatywny wpływ na jakość życia¹⁹, zasadne wydaje się być uwzględnienie tego faktu w funkcji użyteczności. W niniejszej pracy zaprezentujemy jedynie przykładowe zadania optymalizacyjne uwzględniające omówione w poprzednich częściach artykułu aspekty.

Przyjmujemy, że jednostki maksymalizują łączną zdyskontowaną użyteczność daną wzorem:

$$W = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(C, P) dt, \quad (24)$$

gdzie C jest wielkością konsumpcji²⁰, natomiast P oznacza poziom zanieczyszczenia środowiska w gospodarce w danej chwili. W ogólności, warunkiem trwałego wzrostu jest utrzymanie zakumulowanej ilości zanieczyszczeń poniżej pewnego krytycznego poziomu P_{max} , jak również zachowanie dodatkowej wielkości dostępnych zasobów S , jeżeli ewoluuje ona według reguły $\dot{S} = -R$. Dla uproszczenia przyjmijmy założenie, że emisja zanieczyszczeń jest proporcjonalna do ilości wykorzystywanych w procesie produkcji zasobów R , tj. $E = \Omega R$, gdzie Ω również jest współczynnikiem emisyjności, a łączny stopień zanieczyszczenia środowiska jest powiązany z wielkością zanieczyszczeń równaniem

$$\dot{P} = E - mp, \quad (25)$$

gdzie przez m , podobnie jak poprzednio, oznaczamy stopień zdolności ekosystemu do samooczyszczania się.

Dynamika K jest dana równaniem $\dot{K} = Y - C - N - \delta K$. Ewolucja A jest taka sama jak w poprzednich prezentowanych modelach, tj. $\dot{A} = \lambda n \sigma A$. Niech funkcja użyteczności będzie postaci

$$U(C, P) = \frac{C^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - P^\eta, \quad (26)$$

gdzie $\eta > 1$, tj. $\frac{\partial U}{\partial P} < 0$ oraz $\frac{\partial^2 U}{\partial P^2} < 0$.

Zdyskontowany hamiltonian dla tak postawionego problemu jest postaci

$$H = U(C, P) + \theta_1(Y - C - N - \delta K) + \theta_2(\lambda n \sigma A) + \theta_3(-R) + \theta_4(E - mP). \quad (27)$$

¹⁹ Istnieją badania pokazujące istotny związek między stopniem zanieczyszczenia środowiska a np. przeciętnym czasem trwania życia.

²⁰ Ponieważ, tak jak w poprzednio, zakładamy, że wielkość zasobów sił pracy jest stała i unormowana do jedności, to można rozważać C także jako wielkość konsumpcji *per capita*.

Zmiennymi kontrolnymi są C , n , R , natomiast zmiennymi stanu są K , A , S oraz P . Ponieważ, podobnie jak poprzednio, $N = nA_{max} = nA(1-\sigma)$, otrzymujemy

$$H = \frac{C^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} - P^\eta + \theta_1(Y - C - nA(1-\sigma) - \delta K) + \theta_2(\lambda n\sigma A) + \theta_3(-R) + \theta_4(\Omega R - mP) \quad (28)$$

Podejście optymalizacyjne do analizy aspektów teorii wzrostu gospodarczego ma kilka zalet oraz wad. Do niewątpliwych zalet należy m.in. uniknięcie nierealistycznego założenia, że pomioty gospodarcze (zwłaszcza gospodarstwa domowe) nie podejmują żadnych decyzji ekonomicznych, w szczególności nie decydują o poziomie oszczędności i inwestycji w gospodarce. Tak samo w klasycznym modelu Solowa nie uwzględniałyby w decyzjach stanu zanieczyszczeń w gospodarce ani nie decydowały o stopniu zużycia zasobów naturalnych czy nakładach na badania i rozwój. Z drugiej strony narzędzia optymalizacji dynamicznej są dość złożone matematycznie i relatywnie rzadko udaje się uzyskać jawną postać rozwiązania. Do rozwiązania jest bowiem układ kilku równań różniczkowych nieliniowych oraz kilku tożsamości występujących pomiędzy zmiennymi. Często rozwiązanie numeryczne jest jedyną możliwością. Poza tym podważane jest także ciągłe kalkulowanie przez gospodarstwa domowe własnej funkcji użyteczności, w obliczu czego przyjęcie średniej stopy inwestycji wydaje się być lepszym przybliżeniem.

W załączniku 2 przedstawiono próbę rozwiązania modelu, przy uproszczonym założeniu, że zmienną środowiskową funkcji użyteczności jest strumień emisji zanieczyszczeń E zamiast stanu środowiska P . Przy założeniu, że wszystkie zmienne makroekonomiczne modelu zmieniają się ze stałymi stopami (tzn. gospodarka znajduje się w *steady-state*), układ równań określający warunek konieczny optymalności jest sprzeczny. Wynik taki wskazuje na niemożliwość optymalnego wzrostu przy założeniu stałych stóp, aczkolwiek należy potraktować go jako wstępną wskazówkę do dalszych badań.

5. Zakończenie

Schumpeterowski model wzrostu jest zaliczany do grup modeli endogenicznych – stopa postępu technicznego (którego wynikiem jest pojawienie się kolejnych innowacji w poszczególnych sektorach gospodarki) jest określona wewnątrz modelu. Główną cechą modelu jest współzależność procesu akumulacji kapitału oraz procesu tworzenia innowacji. Zwiększenie produkcji na skutek akumulacji kapitału umożliwia zwiększenie nakładów w sektorze B+R, a tym samym osiągnięcie wyższej stopy wzrostu. Tym samym zasoby naturalne są czynnikiem determinującym tempo wzrostu gospodarki w długim okresie.

Spowolnienie tempa wzrostu może jednak mieć swoje dobre strony. Przy upraszczającym założeniu o zależności całkowitej emisji zanieczyszczeń od wielkości produkcji spowolnienie wzrostu gospodarczego oznacza również wolniejszy przyrost

emisji całkowitej. Jeżeli współczynnik emisyjności maleje dostatecznie szybko, natomiast środowisko naturalne posiada zdolność do asymilacji zanieczyszczeń, możliwa jest poprawa stanu środowiska naturalnego przy utrzymaniu wzrostu gospodarczego. Uchylenie założenia o stałej stopie oszczędności umożliwia analizę modelu z i wykorzystanie narzędzi dynamicznej optymalizacji (zasada maksimum). Kluczowe wydaje się być zarówno uwzględnienie zmiennej środowiskowej w funkcji użyteczności typowego przedstawiciela, jak i roli zasobów naturalnych w procesie produkcji. Przy założeniu, że gospodarka osiąga stan *steady-state*, tj. wszystkie zmienne makroekonomiczne zmieniają się ze stałą stopą, otrzymujemy sprzeczność w układzie równań określających warunek konieczny optymalności, co może wskazywać na niemożliwość optymalnego wzrostu gospodarki przy uwzględnieniu zmiennych środowiskowych (zasoby oraz emisje) w modelu. Schumpeterowski model wzrostu gospodarczego może być wykorzystany w celu analizy trwałości wzrostu. Warto jednak zauważyć, że model opiera na wielu dość sztywnych założeniach mikroekonomicznych, które bardzo trudno jest modyfikować w kierunku uwzględniania dodatkowych zmiennych środowiskowych.

Załącznik 1

Przy różniczkowaniu stosuje się twierdzenie o różniczkowaniu całki względem parametru.

$$\begin{aligned}
 \dot{v} &= \frac{d}{dt} \left[\int_t^\infty e^{-\int_t^s r_u + \lambda n_u du} (1 - \alpha) \alpha k_s^\alpha ds \right] \\
 &= \int_t^\infty \frac{d}{dt} \left[e^{-\int_t^s r_u + \lambda n_u du} (1 - \alpha) \alpha k_s^\alpha ds \right] - \left[e^{-\int_t^t r_u + \lambda n_u du} (1 - \alpha) \alpha k_s^\alpha \right] t' = (*) \\
 &= \frac{d}{dt} \left[\int_t^\infty e^{-\int_t^s r_u + \lambda n_u du} (1 - \alpha) \alpha k_s^\alpha ds \right] \\
 &= e^{-\int_t^s r_u + \lambda n_u du} (1 - \alpha) \alpha k_s^\alpha \cdot \frac{d}{dt} \left[- \int_t^s r_u + \lambda n_u du \right] \\
 &= e^{-\int_t^s r_u + \lambda n_u du} (1 - \alpha) \alpha k_s^\alpha \cdot - \left[\int_t^s \frac{d}{dt} [r_u + \lambda n_u] du - (r_t + \lambda n_t) t' \right] \\
 &= e^{-\int_t^s r_u + \lambda n_u du} (1 - \alpha) \alpha k_s^\alpha \cdot (r_t + \lambda n_t); \\
 &e^{-\int_t^t r_u + \lambda n_u du} (1 - \alpha) \alpha k_t^\alpha t' = (1 - \alpha) \alpha k_t^\alpha.
 \end{aligned}$$

Zatem otrzymujemy

$$(*) = (r_t + \lambda n_t)v - (1 - \alpha) \alpha k_t^\alpha.$$

Załącznik 2

$$\begin{aligned}
Y &= A^{1-\alpha} K^\alpha L^\beta R^\nu \\
\dot{K} &= Y - C - N - \delta K \\
L &= I \\
\dot{S} &= -R \\
N &= nA(1 + \sigma) \\
\dot{A} &= \lambda n \sigma A \\
W(C, P) &= \int_0^{+\infty} \left(\frac{C^{1-\varepsilon} - 1}{1 - \varepsilon} - P^\eta \right) e^{-\rho t} dt \\
P &= \Omega R,
\end{aligned}$$

czyli

$$\begin{aligned}
W(C, P) &= \int_0^{+\infty} \left(\frac{C^{1-\varepsilon} - 1}{1 - \varepsilon} - (\Omega R)^\eta \right) e^{-\rho t} dt \\
\dot{K} &= A^{1-\alpha} K^\alpha L^\beta R^\nu - C n A (1 + \sigma) = \delta K \\
\dot{A} &= \lambda n \sigma A \\
\dot{S} &= -R.
\end{aligned}$$

Otrzymujemy hamiltonian postaci:

$$\begin{aligned}
\mathbb{H} &= \left(\frac{C^{1-\varepsilon} - 1}{1 - \varepsilon} - (\Omega R)^\eta \right) e^{-\rho t} + \theta_1 (A^{1-\alpha} K^\alpha L^\beta R^\nu - C - nA(1 - \sigma) - \delta K) \\
&\quad + \theta_2 (\lambda n \sigma A) + \theta_3 (-R).
\end{aligned}$$

Warunki pierwszego rzędu:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mathbb{H}}{\partial C} &= 0 \Leftrightarrow C^{-\varepsilon} e^{-\rho t} - \theta_1 = 0 \\
\frac{\partial \mathbb{H}}{\partial n} &= 0 \Leftrightarrow -\theta_1 A (1 + \sigma) + \theta_2 \lambda \sigma A = 0 \\
\frac{\partial \mathbb{H}}{\partial R} &= 0 \Leftrightarrow \Omega^\eta \eta R^{\eta-1} e^{-\rho t} + \theta_1 \nu A^{1-\alpha} K^\alpha R^{\nu-1} - \theta_3 = 0 \\
\frac{\partial \mathbb{H}}{\partial K} &= -\dot{\theta}_1 \Leftrightarrow \theta_1 (\alpha A^{1-\alpha} K^{\alpha-1} R^\nu - \delta) = -\dot{\theta}_1 \\
\frac{\partial \mathbb{H}}{\partial A} &= -\dot{\theta}_2 \Leftrightarrow \theta_1 ((1 - \alpha) A^{-\alpha} K^\alpha R^\nu - n(1 + \sigma)) + \theta_2 (\lambda n \sigma) = -\dot{\theta}_2 \\
\frac{\partial \mathbb{H}}{\partial S} &= -\dot{\theta}_3 \Leftrightarrow 0 = -\dot{\theta}_3.
\end{aligned}$$

Założmy, że wszystkie stopy zmian zmiennych makroekonomicznych są stałe. Z pierwszego:

$$-\varepsilon g_C - \sigma = g_{\theta_1}$$

a zatem g_{θ_1} jest stałe. Z drugiego:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\lambda\sigma}{1 + \sigma}$$

czyli

$$g_{\theta_1} = g_{\theta_2}.$$

Z czwartego:

$$\alpha A^{1-\alpha} K^{\alpha-1} R^{\nu} - \delta = -g_{\theta_1}$$

czyli

$$(1 - \alpha)g_A + (1 - \alpha)g_K + \nu g_R = 0.$$

Z piątego:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} ((1 - \alpha)A^{-\alpha} K^{\alpha} R^{\nu} - n(1 + \sigma)) + (\lambda n \sigma) = -g_{\theta_2}$$

a zatem

$$\begin{aligned} \frac{\lambda\sigma}{1 + \sigma} ((1 - \alpha)A^{-\alpha} K^{\alpha} R^{\nu} - n(1 + \sigma)) + (\lambda n \sigma) &= -g_{\theta_2} \\ \frac{\lambda\sigma}{1 + \sigma} (1 - \alpha)A^{-\alpha} K^{\alpha} R^{\nu} - \frac{\lambda\sigma}{1 + \sigma} n(1 + \sigma) + (\lambda n \sigma) &= -g_{\theta_2} \\ \frac{\lambda\sigma}{1 + \sigma} (1 - \alpha)A^{-\alpha} K^{\alpha} R^{\nu} - \lambda n \sigma + \lambda n \sigma &= -g_{\theta_2} \\ \frac{\lambda\sigma}{1 + \sigma} (1 - \alpha)A^{-\alpha} K^{\alpha} R^{\nu} &= -g_{\theta_2} \end{aligned}$$

a ponieważ g_{θ_2} jest stałe, to:

$$-\alpha g_A + \alpha g_A + \nu g_R.$$

Z szóstego:

$$g_{\theta_3} = 0,$$

czyli θ_3 jest stałe, co jest sprzeczne z równaniem

$$-\Omega^{\eta} \eta R^{\eta-1} e^{-\rho t} + \theta_1 \nu A^{1-\alpha} K^{\alpha} R^{\nu-1} - \theta_3 = 0.$$

Jeżeli θ_3 jest stałe, to dwa składniki sumy po lewej stronie muszą się odpowiednio dopasować, co jest niemożliwe w przypadku stałych stóp.

Literatura

- Aghion P., 2004, *Growth and development: A Schumpeterian approach*, Annals of Economics and Finance, vol. 5, iss. 1.
- Brock W.A., Taylor A.S., 2010, *The Green Solow model*, Journal of Economic Growth, vol. 15, no. 2, s. 12–153.
- Bringezu S. et. al., 2004, *International comparison of resource use and its relation to economic growth. The development of total material requirement, direct inputs and hidden flows and the structure of TMR*, Ecological Economics, vol. 51, s. 97–124.
- Chiang A.C., 2002, *Elementy dynamicznej optymalizacji*, WSHiFM, Warszawa.
- Howitt P., Aghion P., 1998, *Capital accumulation and innovation as complementary factors in long-run growth*, Journal of Economic Growth, vol. 3.
- Howitt P., Aghion P., 1999, *Endogenous Growth Theory*, The MIT Press, Cambridge.
- Malczewski M., 2013, *Zasoby naturalne, postęp techniczny a długookresowy wzrost gospodarczy*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Meyer B., 2011, *Macroeconomic modelling of sustainable development and the links between the economy and the environment*, Komisja Europejska, <http://ec.europa.eu>.
- Pezzey J., Toman M.A., 2002, *The Economics of Sustainability: A review of Journal Articles, Resources for the Future*, <http://www.rff.org>.
- Stiglitz J., 1974, *Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths*, Review of Economic Studies, vol. 41, iss. 5, s. 123–137.
- Smulders J.A., 2005, *Endogenous technological change, natural resources and growth*, [w:] *Scarcity and Growth Revisited: Natural Resources and the Environment in the New Millennium*, eds. R.D. Simpson, M.A. Toman, R.U. Ayres, RFF Press, Baltimore.
- Solow R., 1974, *Intergenerational equity and exhaustible resources*, Review of Economic Studies, vol. 41, s. 29–45.
- Telega I., 2012, *Trwałość w modelu Solowa. Analiza krytyczna*, Zeszyty Naukowe PTE, nr 12, Kraków.
- Tokarski T., 2011, *Ekonomia matematyczna. Modele makroekonomiczne*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Xepapadeas A., 2005, *Economic Growth and the Environment*, Handbook of Environmental Economics, vol. 3.