

GOSPODARKA NARODOWA

1
(287)
Rok LXXXVII/XXVIII
styczeń–luty
2017
s. 33–51

Maciej MALACZEWSKI*

Warunki przejścia gospodarki na odnawialne źródła energii

Streszczenie: Stopniowe wyczerpywanie się nieodnawialnych zasobów naturalnych jest faktem, gdyż służą one w procesie produkcji nie tylko jako materiał, ale także jako główne źródło energii. Celem artykułu jest dokonanie analizy zagadnienia całkowitego przejścia gospodarki na odnawialne źródła energii. Analizy dokonano za pomocą skonstruowanego prostego modelu matematycznego gospodarki, uwzględniającego komplementarność energii i kapitału fizycznego, w którym decyzję o przejściu na odnawialne źródła energii traktujemy jedynie jako decyzję polityki gospodarczej. Wyznaczono warunki konieczne, które gospodarka musi spełnić, by w ustalonym momencie w przyszłości móc zrezygnować z nieodnawialnych źródeł energii. Do warunków tych należą: odpowiedni poziom preferencji proekologicznych społeczeństwa, niska energochłonność używanego kapitału fizycznego, dostateczne zapasy zasobów naturalnych będących źródłem energii. Określono wpływ poszczególnych aspektów makroekonomicznych na realizację zamierzonej polityki gospodarczej. Artykuł ma charakter teoretyczny.

Słowa kluczowe: nieodnawialne zasoby naturalne, odnawialne źródła energii, komplementarność zasobów naturalnych i kapitału fizycznego

Kody klasyfikacji JEL: Q42, Q43, Q48

Artykuł nadesłany 10 maja 2016 r., zaakceptowany 1 lutego 2017 r.

Wstęp

Stopniowe wyczerpywanie się zasobów naturalnych jest faktem spowodowanym ich ograniczonością, nieodnawialnością oraz niezbędnością w procesie

* Uniwersytet Łódzki, Wydział Ekonomiczno-Socjologiczny, Katedra Ekonometrii; e-mail: maciej.malaczewski@uni.lodz.pl

produkcyjnym. Nieodnawialne zasoby naturalne służą w produkcji jako materiał (dzięki czemu częściowo mogą podlegać recyklingowi), ale także jako źródło energii. Obecnie około 81,4% energii produkowanej na świecie wytwarzanej jest za pomocą nieodnawialnych zasobów naturalnych – ropy naftowej, gazu ziemnego, węgla¹. Udział ten nie ulegnie w najbliższej przyszłości istotnym zmianom, gdyż istniejące prognozy i plany w tym zakresie przewidują jego zmniejszenie do około 75% w 2035 roku. Jeszcze przez długi czas zatem nieodnawialne zasoby naturalne będą głównym źródłem energii dla większości gospodarek świata.

Obecnie zaledwie kilka gospodarek na całym świecie funkcjonuje opierając się wyłącznie na odnawialnych źródłach energii. Gospodarki te są z reguły niewielkie i mają korzystne położenie geograficzne, ułatwiające wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. Jednym z przykładów może być Islandia, kraj, na terenie którego znajduje się kilkadziesiąt czynnych wulkanów, co pozwala w ponad 85% zaspokoić zapotrzebowanie całej gospodarki na energię przy wykorzystaniu energii geotermalnej i elektrowni wodnych. Innym przykładem może być należąca formalnie do Holandii niewielka wyspa Bonaire, leżąca na Morzu Karaibskim, na której około 90% zapotrzebowania na energię pokrywane jest z produkcji opartej na turbinach wiatrowych². Trwają tam prace mające na celu umożliwienie wykorzystania energii pochodzącej z biopaliw, jakimi lokalnie są algi morskie.

W 2014 roku władze Kostaryki ogłosiły, że w kolejnym roku gospodarka tego państwa zamierza wykorzystywać jedynie energię odnawialną. W grudniu 2015 roku informacja ta została potwierdzona, jedynie około 1% zapotrzebowania na energię w ciągu poprzednich 12 miesięcy było pokrywane ze źródeł innych niż odnawialne. Kostaryka jest krajem o sześciokrotnie mniejszej powierzchni niż Polska, zamieszkałym jedynie przez 4,3 miliona mieszkańców. W gospodarce tej nie ma w zasadzie przemysłu ciężkiego, co powoduje, że popyt na energię jest niewysoki. Oprócz tego, rok 2015 był korzystny także z tego względu, iż wyjątkowo obfite opady deszczu na terenie Kostaryki umożliwiły elektrowniom wodnym osiągnięcie rekordowo wysokiej produkcji energii.

Zagadnienie poszukiwania optymalnego momentu przejścia gospodarki na odnawialne źródła energii nie jest w literaturze ekonomicznej nowe. Do najważniejszych prac w tym zakresie należą z pewnością prace Tahvonon i Salo [2001], Amigues et al. [2004], Di Vita [2006], Burke [2010], Mosińo [2012], Maeda i Nagaya [2012] i wiele innych. Ponieważ jednak istniejące prognozy dotyczące odkrytych i nieodkrytych złóż zasobów energetycznych oraz rosnącego popytu na energię sugerują, że zasoby te (w wariantcie pesymistycznym) wyczerpią się nie wcześniej niż w 2035 roku³, to w chwili obecnej

¹ International Energy Agency [2015].

² Co ciekawe, doszło do tego, gdyż w 2004 roku główna znajdująca się na wyspie elektrownia, produkująca energię z nieodnawialnych zasobów naturalnych, spłonęła w przypadkowo wywołanym pożarze.

³ Por. np. Lin et al. [2009].

żadna gospodarka na świecie, włączając w to Kostarykę, nie jest zmuszona przejść wyłącznie na odnawialne źródła energii. Decyzja taka może być zatem przedmiotem ekonomicznej optymalizacji, może też być, i obecnie najczęściej jest, obiektem politycznej kalkulacji rządów wywołanej przez zmieniające się preferencje ekologiczne społeczeństw bądź podpisane umowy międzynarodowe. Dla przykładu, kraje Unii Europejskiej wyraziły zgodę na ograniczenie udziału energii produkowanej ze źródeł nieodnawialnych do 2020 roku⁴. Jest to jednak w tym przypadku decyzja polityczna, niepowodowana ekonomiczną optymalnością⁵.

Z powyższych przyczyn, w niniejszym artykule decyzję o przejściu na odnawialne źródła energii będziemy traktować jedynie jako decyzję polityki gospodarczej. Nie będziemy zatem poszukiwać optymalnego momentu przejścia na odnawialne źródła energii bądź optymalnych stóp inwestycji. Zadamy sobie natomiast pytanie o warunki konieczne, które muszą być spełnione, by taka zmiana reżimu energetycznego mogła w ogóle w danej gospodarce zaistnieć. Zgodnie z wiedzą autora niniejszego artykułu, do tej pory analizy przy takich założeniach nie były przeprowadzane.

Istniejące modele makroekonomiczne, w tym zwłaszcza modele wzrostu gospodarczego, w zdecydowanej większości zakładają substytucyjność zasobów naturalnych (bądź produkowanej za ich pomocą energii) oraz kapitału fizycznego w procesie produkcyjnym – np. Dasgupta i Heal [1974], Solow [1974], Stiglitz [1974], Scholz, Ziemes [1999], Grimaud, Rouge [2008, 2014], da Silva [2008], Pittel, Bretschger [2010], Neustroev [2013] i wiele innych. Substytucyjność taka ma jednak kilka kontrfaktycznych teoretycznych konsekwencji, z których najtrudniejszą do zaakceptowania jest wystarczalność istniejących źródeł energii aż do nieskończoności. Ze względu na ten aspekt pojawiają się prace z alternatywnymi podejściami – np. Georgescu-Roegen [1979], Costanza, Daly [1992], Smulders, de Nooij [2003], van Zon, Yetkiner [2003], Stuermer, Schwerhoff [2013]. W świetle niektórych badań empirycznych sugerujących ścisły związek między szeregami czasowymi produkcji oraz zużycia energii (np. Stern, Cleveland [2004], Costantini and Martini [2010], Stern [2011]) wydaje się konieczne konstruowanie modeli makroekonomicznych, w których energia jest czynnikiem produkcji komplementarnym do kapitału fizycznego i jest niezbędna, by ów kapitał można było w ogóle użytkować w procesie produkcyjnym. Proponowany w niniejszym artykule model zawiera także i ten aspekt, co stanowi istotne rozszerzenie dotychczasowych rozważań toczonych w literaturze.

⁴ Polska także podpisała odpowiednie zobowiązania (mowa o tzw. „Strategii Bezpieczeństwo Energetyczne i Środowisko”), deklarując podniesienie udziału energii produkowanej ze źródeł odnawialnych do 15%.

⁵ Nie oznacza to oczywiście, że decyzja taka nie jest długookresowo dla tych gospodarek korzystna, być może jednak bardziej efektywny ekonomicznie jest inny terminarz bądź plan osiągnięcia zamierzonych celów. Nie jest jednak przedmiotem analiz zawartych w niniejszym artykule ocena optymalności ekonomicznej tej lub innej decyzji.

Artykuł ma zatem na celu wskazanie warunków koniecznych dla skutecznej realizacji polityki gospodarczej, która nakierowana byłaby na całkowite przejście w produkcji energii na odnawialne jej źródła. Cel ten zostanie osiągnięty dzięki analizie skonstruowanego, autorskiego modelu matematycznego. Struktura artykułu jest następująca. W części następniej opisany zostanie model gospodarki, w której podjęta została decyzja o całkowitym przejściu na odnawialne źródła energii. W kolejnym punkcie dokonana zostanie analiza rozwiązania tego modelu oraz wyprowadzone zostaną warunki konieczne, które muszą być spełnione, by przejście modelowanej gospodarki na odnawialne źródła energii było możliwe z zachowaniem proponowanych warunków. Kolejna część zawiera analizę zachowania gospodarki po przekroczeniu chwili, począwszy od której całościowy popyt na energię jest zaspokajany z odnawialnych źródeł. W części tej wskazane są warunki zrównoważonej akumulacji obu form kapitału fizycznego. W dalszej części przeprowadzona jest dyskusja na temat uzyskanych rezultatów oraz wskazane są implikacje dla polityki gospodarczej. Całość kończy podsumowanie.

Autor pragnie w tym miejscu podziękować uczestnikom dorocznej konferencji „Matematyka i Informatyka na usługach Ekonomii” oraz trzem anonimowym recenzentom za liczne cenne uwagi, które znacząco pomogły ulepszyć niniejszy artykuł. Na szczególne podziękowanie zasługuje dr Paulina Malaczewska. Za wszystkie błędy i niedociągnięcia winę ponosi jedynie autor.

Model gospodarki

Rozważamy gospodarkę zamkniętą, dla której konstruujemy model dyskretny, trójokresowy⁶. W gospodarce tej rząd na początku okresu 0 podejmuje decyzję o całkowitej rezygnacji w pewnym, nieodległym czasie, na początku okresu T , z wykorzystywania energii produkowanej z nieodnawialnych zasobów naturalnych (takich jak ropa naftowa, węgiel i gaz ziemny) oraz o zaspokojeniu popytu na energię wyłącznie ze źródeł odnawialnych (takich jak energia słoneczna, wodna, geotermalna itp.). Do tej całkowitej zmiany niezbędne jest wybudowanie w gospodarce elektrowni słonecznych, wiatrowych, wodnych itp. oraz całej niezbędnej infrastruktury, o której zakładamy, iż w momencie początkowym (a zatem w momencie podejmowania decyzji) nie ma jej w gospodarce w ogóle⁷. W gospodarce będą zatem występować dwie formy kapitału – pierwsza z nich stanowi czynnik produkcji i służy do wytwarzania pro-

⁶ Na początku okresu oznaczanego przez indeks 0 gospodarka podejmuje decyzję o rezygnacji z nieodnawialnych zasobów naturalnych jako źródła energii oraz przygotowuje się do tego poprzez akumulację kapitału fizycznego. Na początku okresu oznaczonego przez T gospodarka przechodzi w całości na zasoby odnawialne, po czym, w okresie T oraz okresie $T+1$, kontynuuje obroną politykę gospodarczą.

⁷ Oczywiście jest to pewne matematyczne uproszczenie rzeczywistości, w każdej bez wyjątku gospodarce świata przynajmniej ułamek procenta energii jest produkowany z użyciem odnawialnych źródeł. Istnienie jednak pewnego zasobu kapitału wykorzystywanego w produkcji energii

duktu (np. maszyny, pojazdy produkcyjne, transportowe, komputery, budynki itp.), druga, której brak w momencie startowym zakładamy, jest czynnikiem produkcji energii wytwarzanej ze źródeł odnawialnych (a zatem w skład tej formy kapitału wchodzi elektrownie wodne, turbiny wiatrowe itp.).

W gospodarce występują dwa sektory. Pierwszy sektor to sektor produkcyjny. W sektorze tym zatrudnione są podstawowe czynniki produkcji – kapitał (K) i praca (L) – oraz wytwarzany jest produkt Y . W momencie początkowym gospodarka posiada zasób kapitału fizycznego równy K_0 oraz zasoby sił pracy równe L_0 . Zakładamy, że funkcja produkcji jest typu Cobba-Douglasa⁸, a zatem wielkość wytworzonego produktu przy użyciu istniejących w danym okresie $t \in \{0; T; T + 1\}$ zasobów kapitału i pracy dana jest wzorem:

$$Y_t = F(K_t, L_t) = AK_t^\alpha L_t^{1-\alpha}, \quad (1)$$

gdzie $\alpha \in (0; 1)$ oraz $1 - \alpha \in (0; 1)$ stanowią elastyczności produkcji względem, odpowiednio, kapitału fizycznego i pracy, a A oznacza łączną produktywność czynników produkcji, a zatem wielkość produktu wytwarzaną przy użyciu jednostkowych nakładów obu czynników produkcji. A można również interpretować w kategoriach stopnia zaawansowania technologicznego – im wyższa wartość parametru A tym proces produkcyjny jest bardziej rozwinięty technologicznie. W naszym modelu będziemy zakładać stałość A – w interesującym nas przedziale czasu gospodarka nie wprowadza ulepszeń technologicznych istotnie zmieniających charakter procesu produkcyjnego. Tak określona funkcja produkcji wykazuje się stałymi efektami skali – jest bowiem jednorodna stopnia pierwszego. Wytworzony w gospodarce produkt rozdysponowywany jest pomiędzy konsumpcję oraz inwestycje.

Użytkowany w procesie produkcyjnym kapitał fizyczny wymaga energii, zakładamy, że popyt na nią (E^d) jest proporcjonalny liniowo do zasobu kapitału K :

$$E_t^d = dK_t, \quad (2)$$

gdzie d jest współczynnikiem energochłonności kapitału K i określa ilość jednostek energii jaka jest niezbędna, by zaspokoić zapotrzebowanie energetyczne

nie zmienia prowadzonych analiz w istotny sposób. Wygodniej zatem, bez straty ogólności rozważań, jest rozpatrywać przypadek braku takiego zasobu w momencie początkowym.

⁸ Jest to standardowa funkcja produkcji używana w matematycznych modelach makroekonomicznych, patrz np. Tokarski [2011], używana także w modelach z zasobami naturalnymi (por. np. Malaczewski [2014]). Można oczywiście toczyć rozważania analogiczne do tych prowadzonych w niniejszym artykule przy założeniu innej niż klasyczna funkcji produkcji – trudno bowiem wskazać argumenty merytoryczne, które w jednoznaczny sposób wskazywałyby konieczność zastosowania takiej, a nie innej postaci tej funkcji. Wrażliwość rozwiązań na zmianę postaci funkcji produkcji nie jest jednak obiektem zainteresowania niniejszego artykułu. Autor zdecydował się zatem założyć najmniej, wydawałoby się, kontrowersyjną postać tejże funkcji w proponowanym modelu.

jednostki kapitału fizycznego⁹. Jeśli zatem zasoby kapitału K wynoszą jedną jednostkę, to popyt na energię jest dokładnie równy d jednostek. Nietrudno zauważyć, że ewentualny spadek wartości parametru d w czasie jest jednym z efektów postępu technicznego. Podobnie jak w przypadku parametru A , także i tu zakładamy stałość parametru d w analizowanym okresie.

Drugi sektor gospodarki jest sektorem produkcji energii. Zadaniem tego sektora jest wytworzenie wystarczającej ilości energii do zasilenia istniejącego i używanego zasobu kapitału fizycznego¹⁰. W momencie początkowym energia produkowana w gospodarce pochodzi wyłącznie z nieodnawialnych źródeł, a zatem ze spalania strumienia zasobów naturalnych. Wielkość produkcji energii z nieodnawialnych źródeł dana jest wzorem:

$$E_t = F(R_t) = B_R R_t^\gamma, \quad (3)$$

gdzie E oznacza wielkość wytworzonej energii, R jest wielkością strumienia spalanych zasobów naturalnych, $\gamma > 0$ jest elastycznością produkcji energii względem strumienia zasobów naturalnych, B_R odzwierciedla zaś stopień zaawansowania technologicznego procesu produkcji energii przy wykorzystaniu nieodnawialnych zasobów naturalnych¹¹. Zauważmy, że jednostka zasobów naturalnych pozwala wytworzyć dokładnie B_R jednostek energii. Im wyższe zatem B_R tym efektywniej spalane są zasoby naturalne i tym niższe są powstałe przy tej okazji straty.

W momencie, w którym gospodarka decyduje się na przejście na wyłącznie odnawialne źródła energii, zasoby naturalne nie są już dłużej potrzebne do produkcji energii. Wówczas energia produkowana jest jedynie przy udziale szczególnej formy kapitału fizycznego M oraz odpowiedniej technologii produkcji B_M . Zależność między istniejącym zasobem kapitału M a wielkością produkowanej energii jest liniowa – zakładamy bowiem, że jeśli potrzebujemy wyprodukować dwa razy tyle energii, ile jest w stanie wytworzyć jedna elektrownia wodna, konieczne jest zakumulowanie kapitału M w wystarczającej ilości, by mogła powstać druga, identyczna elektrownia wodna:

$$E_t = F(M_t) = B_M M_t. \quad (4)$$

⁹ Trudno jest znaleźć w literaturze przykłady funkcji popytu na energię w zależności od zasobów kapitału fizycznego, wydaje się jednak, że liniowa postać tejże funkcji dobrze oddaje relację pomiędzy tymi wielkościami.

¹⁰ Teoretycznie możliwe jest wytwarzanie większej ilości energii niż jest potrzebna do zasilenia używanego kapitału fizycznego, ze względu jednak na dość ograniczone możliwości jej składowania byłoby to nieefektywne. Tak samo, produkowanie zbyt małej ilości energii spowodowałoby, iż część kapitału fizycznego nie byłaby użytkowana. Stąd będziemy zakładać, że popyt na energię jest dokładnie równy wielkości jej produkcji.

¹¹ Dowolność wartości parametru γ pozwala nam jednocześnie rozważyć sytuacje zależności liniowych, o malejących krańcowych przyrostach oraz rosnących krańcowych przyrostach. Efektywność spalania różnych rodzajów nieodnawialnych zasobów naturalnych jest bowiem różna i trudno jest wnioskować jaki jest jej średni poziom w danej gospodarce.

W momencie startowym w gospodarce nie występuje żaden zasób kapitału M , a zatem gospodarka nie jest w stanie wytworzyć energii ze źródeł odnawialnych. Jedynym źródłem energii są wówczas nieodnawialne zasoby naturalne.

Akumulowanie obu form kapitału odbywa się poprzez inwestycje, których łączna sumaryczna wielkość ograniczona jest poprzez decyzję rządu związaną z utrzymaniem odpowiedniego poziomu konsumpcji. Ów poziom konsumpcji zależny jest od dotychczasowej wielkości konsumpcji w danej gospodarce oraz od preferencji ekologicznych danego społeczeństwa – społeczeństwa nastawione bardziej proekologicznie będą w stanie zgodzić się na niższy poziom konsumpcji w okresie przejściowym wobec rychłej zmiany źródeł energii na odnawialne. Wyższy poziom wyrzeczenia obecnej generacji zaowocuje także wyższym stopniem akumulacji obu form kapitału, a zatem także wyższym poziomem produkcji po okresie T .

Załóżmy zatem, że rząd opierając się na dotychczasowej ścieżce konsumpcji gospodarki oraz na preferencjach proekologicznych społeczeństwa decyduje, by pewien konkretny udział produktu s przeznaczyć w całości na inwestycje w obie formy kapitału w analizowanym okresie. Pozostała część produktu, $1 - s$, przeznaczona zostanie na konsumpcję gospodarstw domowych, co może owocować jej wzrostem, stałością lub spadkiem w stosunku do poprzedniego okresu. Udział s rozdysponowany jest pomiędzy inwestycje w obie formy kapitału. I tak, niech s_K stanowi stopę inwestycji w kapitał K , a s_M – stopę inwestycji w kapitał M . Oczywiście:

$$s = s_K + s_M. \quad (5)$$

Ewolucja obu form kapitału przebiega w klasyczny sposób. Zasoby kapitału na początku kolejnego analizowanego okresu (a zatem w momencie całkowitego przejścia gospodarki na odnawialne źródła energii) są zatem równe zasobom tegoż kapitału na początku analizowanego okresu (na początku okresu 0) powiększonym o dokonane w danym okresie inwestycje i pomniejszonym o jego deprecjację:

$$K_T = K_0 + s_K Y - \lambda K_0 = K_0(1 - \lambda) + s_K A K_0^\alpha L_0^{1-\alpha}, \quad (6)$$

gdzie K_T oznacza wielkość zasobów kapitału fizycznego K w momencie T , a λ stanowi współczynnik deprecjacji kapitału. Analogicznie przebiega ewolucja kapitału fizycznego M , z tą tylko różnicą, że w momencie startowym gospodarka nie posiada żadnych jego zasobów. Wielkość zakumulowanych zatem zasobów kapitału M w momencie T jest równa wielkości dokonanych w całym analizowanym okresie inwestycji:

$$M_T = s_M Y = s_M A K_0^\alpha L_0^{1-\alpha}. \quad (7)$$

W następnym podpunkcie dokonamy rozwiązania opisanego modelu oraz jego szczegółowej analizy. Wskażemy też warunki konieczne do realizacji zamierzonej polityki gospodarczej.

Warunki konieczne realizacji polityki gospodarczej

Równość popytu na energię (2) oraz wielkości produkcji energii (4) w momencie T prowadzi nas do równania¹²:

$$dK_T = B_M M_T. \quad (8)$$

Korzystając z równań ewolucji obu form kapitału (6) i (7) oraz z równania (5) otrzymujemy:

$$dK_0(1-\lambda) + ds_K AK_0^\alpha L_0^{1-\alpha} = B_M (s - s_K) AK_0^\alpha L_0^{1-\alpha}. \quad (9)$$

Dzieląc obie strony równania (9) przez L_0 , wprowadzając zmienną $k_t = \frac{K_t}{L_t}$ i dokonując kilku przekształceń algebraicznych uzyskujemy:

$$s_K = \frac{B_M s - \frac{dk_0^{1-\alpha}(1-\lambda)}{A}}{d + B_M} \in (0; s). \quad (10)$$

Korzystając znów z równania (5) otrzymujemy też wzór na drugą stopę inwestycji:

$$s_M = s - s_K = \frac{sd + \frac{dk_0^{1-\alpha}(1-\lambda)}{A}}{d + B_M} \in (0; s). \quad (11)$$

Stopy inwestycji w obie formy kapitału zależą od parametrów makroekonomicznych gospodarki: łącznej produktywności czynników produkcji, poziomu energochłonności kapitału fizycznego, elastyczności produkcji względem kapitału K , startowego wyposażenia gospodarki w kapitał fizyczny per capita. Analiza równań (10) oraz (11) prowadzi do wniosków, że:

- $\frac{\partial s_K}{\partial B_M} > 0$ i $\frac{\partial s_M}{\partial B_M} < 0$ – przy wyższym poziomie zaawansowania technolo-

gicznego sektora produkcji energii ze źródeł odnawialnych mniejszy zasób kapitału fizycznego M jest potrzebny, by wytworzyć wystarczająco energii do zaspokojenia popytu generowanego przez odpowiedni zasób kapitału K . Stąd inwestycje w kapitał M mogą zostać zmniejszone, co owocuje zwiększeniem inwestycji w kapitał K , a przez to także wyższą produkcją w momencie T .

¹² W rzeczywistości do realizacji proponowanej polityki gospodarczej nie jest konieczna ścisła równość tych dwóch wielkości ekonomicznych, wystarczy, że podaż energii będzie większa od popytu. Z ekonomicznego punktu widzenia jednak zakumulowanie większej ilości kapitału fizycznego M niż jest niezbędne jest pewną nieefektywnością, a zatem będziemy rozważać jedynie równość tych dwóch wielkości.

- $\frac{\partial s_K}{\partial s} > 0$ i $\frac{\partial s_M}{\partial s} > 0$ – jeżeli preferencje ludności zmieniają się tak, iż społeczeństwo zaakceptuje niższą konsumpcję w okresie przejściowym (czyli do momentu zmiany źródeł energii na odnawialne), to łączna pula przeznaczona na inwestycje w obie formy kapitału będzie większa. To oznacza możliwość proporcjonalnego zwiększenia inwestycji w obie formy kapitału, co zaowocuje wzrostem produkcji w momencie T i następnych¹³.
- $\frac{\partial s_K}{\partial d} < 0$ i $\frac{\partial s_M}{\partial d} > 0$ – jeżeli istniejący kapitał fizyczny wymagający energii stanie się mniej energochłonny (a zatem d z jakichś przyczyn przyjmie niższą wartość), wówczas ten sam zasób kapitału K będzie wymagać mniejszej ilości energii. To pociągnie za sobą niezbędność akumulacji mniejszego zasobu kapitału M , co prowadzi do odpowiednich, proporcjonalnych zmian w wysokości inwestycji w obie formy kapitału.
- $\frac{\partial s_K}{\partial \lambda} > 0$ i $\frac{\partial s_M}{\partial \lambda} < 0$ – wzrost tempa zużywania się kapitału fizycznego prowadzi z jednej strony do konieczności zwiększenia inwestycji w kapitał K (w celu zastąpienia zużytego kapitału przez nowy), a jednocześnie oznacza niższy oczekiwany zasób tegoż kapitału w momencie T , co wymaga niższych nakładów kapitału M w produkcji energii, a zatem niższych inwestycji w ten kapitał.
- $\frac{\partial s_K}{\partial k} < 0$ i $\frac{\partial s_M}{\partial k} > 0$ – wyższe startowe wyposażenie w kapitał fizyczny K w przeliczeniu na jednostkę pracy oznacza konieczność wyższych inwestycji w kapitał M w celu zaspokojenia wyższego popytu na energię w momencie T . Oznacza to wzrost poziomu inwestycji w tę formę kapitału i jednocześnie proporcjonalny spadek inwestycji w drugą formę kapitału.
- $\frac{\partial s_K}{\partial \alpha} > 0$ i $\frac{\partial s_M}{\partial \alpha} < 0$ – wyższa elastyczność produkcji względem kapitału fizycznego K oznacza wyższą produktywność tego czynnika produkcji. Przy wyższej produktywności ten zasób kapitału K jest w stanie wytworzyć większą ilość produktu, co bezpośrednio przekłada się na wyższą wartość inwestycji w obie formy kapitału. Przekłada się to dalej na opłacalność inwestycji w kapitał K (co daje proporcjonalnie wyższą wartość produktu) oraz niższą stopę inwestycji w kapitał M , co, przy wyższej wartości łącznego produktu, da taką samą lub wyższą wartość inwestycji w ten kapitał.

¹³ W tym miejscu, jak i w następnych, należy pamiętać, że nie jest powiedziane, że ów wzrost produkcji w momencie T będzie tak duży, by łączna produkcja przewyższyła wielkość produkcji, która byłaby osiągalna, gdyby gospodarka nie zdecydowała się w ogóle na całościowe przejście na odnawialne źródła energii.

- $\frac{\partial s_K}{\partial A} > 0$ i $\frac{\partial s_M}{\partial A} < 0$ – przy wyższym poziomie technologii procesu produkcyjnego jednostka kapitału K wytworzy więcej produktu, a zatem dostępna jest większa wartość inwestycji w obie formy kapitału. To powoduje, iż stopa inwestycji w kapitał M może ulec obniżeniu, co nie spowoduje zmniejszenia wartości inwestycji w tę formę kapitału, a jednocześnie może wzrosnąć stopa inwestycji w kapitał K , co zaowocuje wyższą produkcją w momencie T .

Należy następnie sprawdzić, czy uzyskane stopy inwestycji gwarantujące odpowiednią akumulację obu form kapitałów należą do przedziału $(0; s)$. Może bowiem zdarzyć się, że zaproponowany przez rząd udział produktu przeznaczony na inwestycje nie jest wystarczający, by w planowanym okresie zakumulować wystarczająco dużo kapitału M , by zaspokoić popyt na energię, jaki będzie generowany przez kapitał K w momencie T , nawet jeżeli całość inwestycji przeznaczalibyśmy na akumulację M . Nietrudno zauważyć, że warunek:

$$s_K = \frac{B_{Ms} - \frac{dk_0^{1-\alpha}(1-\lambda)}{A}}{d + B_M} < s \quad (12)$$

jest zawsze spełniony¹⁴. Rozważmy nierówność

$$s_K = \frac{B_{Ms} - \frac{dk_0^{1-\alpha}(1-\lambda)}{A}}{d + B_M} > 0. \quad (13)$$

Po kilku przekształceniach uzyskujemy:

$$s > \frac{dk_0^{1-\alpha}(1-\lambda)}{B_M A} = s_0, \quad (14)$$

gdzie przez s_0 oznaczmy graniczną stopę inwestycji. Wybrana przez rząd stopa s musi być wyższa od s_0 , aby zaproponowana polityka gospodarcza polegająca na przejściu na wyłącznie odnawialne źródła energii była realizowalna, tj. by można było w ciągu planowanego okresu zakumulować wystarczająco dużo kapitału fizycznego służącego do produkcji energii bez naruszenia pożądanej ścieżki konsumpcji. Zauważmy, że im:

- $\frac{\partial s_0}{\partial B_M} < 0$ – niższy stopień zaawansowania technologicznego sektora produkcji energii ze źródeł odnawialnych;

¹⁴ Te proste obliczenia polegające na przekształceniach algebraicznych pomijamy w celu zmniejszenia objętości niniejszego artykułu.

- $\frac{\partial s_0}{\partial d} > 0$ – wyższa energochłonność kapitału fizycznego K ;
- $\frac{\partial s_0}{\partial \lambda} < 0$ – niższa stopa deprecjacji kapitału fizycznego K ;
- $\frac{\partial s_0}{\partial k} > 0$ – wyższe startowe wyposażenie gospodarki w kapitał fizyczny K w przeliczeniu na jednostkę pracy;
- $\frac{\partial s_0}{\partial \alpha} < 0$ – niższa elastyczność produkcji względem kapitału fizycznego K ;
- $\frac{\partial s_0}{\partial A} < 0$ – niższy poziom łącznej produktywności czynników produkcji w sektorze produkcyjnym;

tym większy udział wytwarzanego w gospodarce produktu musi być przeznaczony na inwestycje w obie formy kapitału w analizowanym okresie. Jest to spowodowane faktem, iż przy wyższym oczekiwanym zasobie kapitału K w momencie T (o czym pośrednio informują k_0 , λ , α oraz A) oraz przy wyższym popycie na energię i niższej jej przewidywanej produkcji (o czym informują B_M oraz d) konieczne jest zintensyfikowanie inwestycji w celu uzyskania wyższego poziomu zasobu kapitału M w momencie T . Z drugiej strony, występuje odgórne ograniczenie na s związane z preferencjami ekologicznymi społeczeństwa oraz z jego oczekiwaniami dotyczącymi zmian ścieżki konsumpcji. Te dwa ograniczenia stanowią naturalną podstawę do decyzji rządu i pozwalają określić, czy należy podejmować się przejścia na odnawialne źródła energii w konkretnym momencie. Jeśli nie jest możliwe uzyskanie wystarczających inwestycji w kapitał fizyczny wówczas wskazana jest zmiana parametrów makroekonomicznych gospodarki, by podjąć taką próbę w nieodległej przyszłości. Zmiana tych parametrów może wymagać np. poprawy technologii wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych (B_M) lub akumulacji kapitału fizycznego produkcyjnego o niższej energochłonności (d) itp.¹⁵

Gospodarka, która zamierza zrezygnować z nieodnawialnych źródeł energii i w określonym momencie posiadać wystarczająco dużo elektrowni produkujących energię ze źródeł odnawialnych, musi zapewnić sobie wystarczającą ilość zapasów zasobów naturalnych nieodnawialnych, będących źródłem energii, by zaspokoić wszelki popyt na energię, jaki w okresie przejściowym może się pojawić. Równość popytu na energię (2) oraz równania produkcji energii ze źródeł nieodnawialnych (3) oznacza, że niezbędny zapas złóż zasobu naturalnego jest dany wzorem:

$$R_0 = \left(\frac{dK_0}{B_R} \right)^{\frac{1}{\gamma}}. \quad (15)$$

¹⁵ Do identycznych matematycznie wniosków prowadzi rozważenie analogicznych warunków $sM > 0$ i $sM < s$. Te obliczenia zostawiamy zainteresowanemu czytelnikowi do sprawdzenia.

Wielkość tych zapasów jest zależna dodatnio od startowego wyposażenia w kapitał fizyczny oraz poziomu jego energochłonności ($\frac{\partial R_0}{\partial d} > 0$, $\frac{\partial R}{\partial K_0} > 0$), co łącznie określa popyt na energię, a także ujemnie od poziomu zaawansowania technologicznego produkcji energii z zasobów nieodnawialnych i elastyczności produkcji energii względem zużytych zasobów naturalnych ($\frac{\partial R_0}{\partial B_R} < 0$, $\frac{\partial R_0}{\partial \gamma} < 0$), co z kolei określa produktywność energetyczną jednostki zasobów naturalnych.

W następnej części dokonamy analizy zachowania gospodarki po przejściu na odnawialne źródła energii.

Analiza dalszego zachowania gospodarki

W tej części dokonamy analizy zachowania gospodarki po momencie T , w którym gospodarka przeszła na odnawialne źródła energii. W chwili T w gospodarce jest pewien zasób produkcyjnego kapitału fizycznego K oraz wystarczający, proporcjonalny do niego, zasób kapitału M , który służy do wytwarzania energii. Dzięki niemu gospodarka jest w stanie całkowicie zaspokoić popyt na energię, który powstaje poprzez użytkowanie w procesie produkcyjnym kapitału K . Aby jednak nie doprowadzić do występowania niezaspokojonego popytu na energię w przyszłości oba zasoby kapitału muszą proporcjonalnie rosnać w czasie. Z drugiej strony, podobnie jak i poprzednio, rząd musi podjąć decyzję dotyczącą udziału produktu przeznaczanego na łączne inwestycje w obie formy kapitału. Odpowiedni wybór podyktowany jest znów chęcią zapewnienia właściwego tempa wzrostu konsumpcji.

Dokonajmy analizy stóp inwestycji po początku okresu T . Załóżmy, że troska o odpowiednią wówczas ścieżkę konsumpcji narzuca rządowi wybór udziału produktu przeznaczanego na inwestycje, który będziemy tym razem oznaczać przez \tilde{s} . Wówczas oczywiście:

$$\tilde{s} = \tilde{s}_K + \tilde{s}_M, \quad (16)$$

gdzie przez \tilde{s}_K oraz \tilde{s}_M oznaczamy stopy inwestycji w kapitał (odpowiednio) typu K oraz typu M po początku okresu T . Aby zapewnić zaspokojenie popytu na energię w okresie po przejściu gospodarki na odnawialne źródła energii, należy zadbać, by tempa wzrostu obu form kapitału były względem siebie odpowiednio proporcjonalne. W każdym momencie zatem (zwłaszcza w okresie $T+1$) musi być zapewniona równość:

$$dK_{T+1} = B_M M_{T+1}. \quad (17)$$

Ewolucja obu form kapitału zapisana na okres $T + 1$ przyjmuje następującą postać:

$$K_{T+1} = K_T + s_K Y_T - \lambda K_T = K_T(1 - \lambda) + s_K A K_T^\alpha L_T^{1-\alpha}, \quad (18)$$

$$M_{T+1} = M_T + s_M Y_T - \lambda_M M_T = M_T(1 - \lambda_M) + s_M A K_T^\alpha L_T^{1-\alpha}. \quad (19)$$

Wstawiając równania ewolucji obu form kapitału do równania (17) oraz podstawiając $\tilde{s}_M = \tilde{s} - \tilde{s}_K$ otrzymujemy zależności:

$$\tilde{s}_K = \frac{\frac{B_M m_T (1 - \lambda_M)}{A k_T^\alpha} + B_M \tilde{s} - \frac{d k_T^{1-\alpha} (1 - \lambda)}{A}}{d + B_M}, \quad (20)$$

$$\tilde{s}_M = \frac{d \tilde{s} - \frac{B_M m_T (1 - \lambda_M)}{A k_T^\alpha} + \frac{d k_T^{1-\alpha} (1 - \lambda)}{A}}{d + B_M}, \quad (21)$$

gdzie $m = \frac{M}{L}$. Z powyższych równań wynika, że po przejściu na odnawialne źródła energii inwestycje w kapitał fizyczny M mogą ulec zmniejszeniu, nie ma już bowiem potrzeby dokonywania nagłej jego akumulacji. Jednocześnie mogą wzrosnąć inwestycje w kapitał fizyczny K . Zauważmy, że w stosunku do poprzednich wartości (równania (10) i (11)) stopy inwestycji różnią się

odpowiednio o jednakową wartość $p = \frac{B_M m_T (1 - \lambda_M)}{d + B_M} \frac{A k_T^\alpha}{A}$. Różnica ta jest tym

większa, im:

- $\frac{\partial p}{\partial B_M} > 0$ – wyższy jest stopień zaawansowania technologii produkcji energii;
- $\frac{\partial p}{\partial d} < 0$ – niższa jest energochłonność kapitału;
- $\frac{\partial p}{\partial \lambda_M} < 0$ – niższy jest stopień deprecjacji kapitału fizycznego użytkowanego w procesie produkcji energii;
- $\frac{\partial p}{\partial k_T} < 0$ – niższy jest poziom produkcyjnego kapitału fizycznego w przeliczeniu na jednostkę pracy;
- $\frac{\partial p}{\partial \alpha} < 0$ – niższa jest elastyczność produkcji względem kapitału K ;

- $\frac{\partial p}{\partial A} < 0$ – niższy jest poziom zaawansowania technologicznego produkcji;
- $\frac{\partial p}{\partial m_T} > 0$ – wyższy jest zasób kapitału M w przeliczeniu na jednostkę pracy

w gospodarce.

Przy tak ustalonych udziałach inwestycji w poszczególne formy kapitału w łącznym całkowitym produkcie dalsza ewolucja K i M przebiega we wzajemnie proporcjonalnym tempie. Przyrost zatem zapotrzebowania na energię spowodowany wzrostem zasobu kapitału fizycznego użytkowanego w procesie produkcji jest rekompensowany przez wzrost zasobu kapitału fizycznego M , który pozwala wyprodukować dość energii na zaspokojenie zwiększonego popytu.

Wnioski dla polityki gospodarczej

W poprzednich dwóch podpunktach dokonaliśmy analizy zaprezentowanego modelu. Wynikiem tej analizy jest wyznaczenie takich stóp inwestycji w obie formy kapitału, które zapewnią proporcjonalny wzrost K i M w gospodarce. Proporcjonalność tego wzrostu polega na tym, że w ustalonym momencie T , w którym gospodarka zamierza zrezygnować z produkcji energii za pomocą nieodnawialnych zasobów naturalnych, zasoby obu kapitałów zostały zakumulowane na poziomie, który zapewnia całkowite zaspokojenie popytu na energię. Produkcja energii odbywa się od tego momentu wyłącznie dzięki energii odnawialnej, co zapewnia zakumulowany na odpowiednim poziomie zasób kapitału M . Oprócz tego wysokość inwestycji jest tak dobrana, by ścieżka konsumpcji gospodarstw domowych nie została poddana wahaniom niepreferowanym przez gospodarstwa domowe. Tak opisane warunki pozwalają sprawdzić, czy gospodarka w momencie początkowym jest w stanie podjąć zobowiązanie o rezygnacji z produkcji energii za pomocą nieodnawialnych zasobów naturalnych w pewnym momencie T w przyszłości.

Jeżeli wartości parametrów makroekonomicznych gospodarki w momencie 0 pozwalają na dokonanie takiego zobowiązania na moment T i istnieje graniczące z pewnością przekonanie, że w przedziale czasu $(0; T)$ wartości te nie zmieniają się na niekorzystne, to gospodarka jest w stanie takie zobowiązanie zrealizować, oczywiście pod warunkiem ścisłego przestrzegania reguł akumulacji kapitału, jakie z tego wynikają. Jeśli jednak wartości parametrów makroekonomicznych nie pozwalają na osiągnięcie odpowiednich stóp inwestycji, wówczas, o ile oczywiście rząd podtrzymuje swoje zamiary, należy wdrożyć politykę gospodarczą nakierowaną na zmianę niekorzystnych uwarunkowań. I tak, gospodarka może odłożyć w czasie podjęcie decyzji do chwili aż, np.:

- ulegną zmianie preferencje gospodarstw domowych na bardziej proekologiczne, co pozwoli na obniżenie poziomu konsumpcji bez wzbudzenia niepokojów społecznych. Da to możliwość przeznaczenia wyższego udziału łącznej produkcji na całkowite inwestycje w obie formy kapitału;

- zostanie zakumulowana wystarczająca ilość nisko energochłonnego kapitału produkcyjnego K tak, by łączny, średni poziom energochłonności w gospodarce obniżył się. Pozwoli to na zaspokojenie niższego popytu na energię przy jednakowym zasobie produkcyjnego kapitału fizycznego, co z kolei prowadzi do niższych wymaganych inwestycji w kapitał fizyczny M .
- ulegną zmianie poziomy technologiczne sektora produkcyjnego bądź sektora produkcji energii. W przypadku wystąpienia postępu technicznego ten sam poziom kapitału fizycznego K pozwala wytworzyć więcej produktu, a ten sam poziom kapitału fizycznego M – więcej energii. To pozwoli na uzyskanie większego łącznego produktu do rozdziału pomiędzy konsumpcję i inwestycje oraz na zaspokojenie wyższego popytu na energię z zachowaniem istniejącej infrastruktury produkcyjnej sektora energetycznego.

Trudno jest proponować gospodarkom politykę gospodarczą nakierowaną np. na zmniejszenie zasobu kapitału fizycznego w przeliczeniu na jednostkę pracy, potencjalnie jednak taka możliwość też może być brana pod uwagę (co wynika z przeprowadzonych analiz). Jednostka prowadząca politykę gospodarczą i podejmująca ostateczną decyzję o przejściu gospodarki na odnawialne źródła energii może także podjąć taką decyzję w oderwaniu od preferencji ludności, zmuszając ją niejako do przyjęcia zaproponowanego poziomu konsumpcji.

Opisywany model nie jest wolny od dyskusyjnych uproszczeń. I tak, na przykład, w modelu założono brak postępu technicznego, co bezpośrednio objawiało się stałością łącznej produktywności czynników produkcji, energochłonności kapitału fizycznego oraz parametrów funkcji produkcji energii. Tymczasem we wszystkich sektorach gospodarki występuje postęp techniczny – zwłaszcza sektor produkcji energii, zarówno ze źródeł odnawialnych, jak i nieodnawialnych, doświadcza dość dynamicznego rozwoju technologicznego. Uwzględnienie postępu technicznego w analizowanym modelu nie zmieniłoby jednak płynących z niego jakościowych wniosków. Miałyby jednak wpływ na szczegółowe poziomy np. stóp inwestycji – gospodarka, która prognozuje w zbliżającym się okresie dynamiczny postęp techniczny, może pozwolić sobie na obniżanie w czasie niezbędnego udziału produktu przeznaczanego na inwestycje w obie formy kapitału i, tym samym, stopniowe podwyższanie ścieżki konsumpcji gospodarstw domowych.

Kilkakrotnie w trakcie konstrukcji modelu wspomniano, iż rząd powinien wziąć pod uwagę preferencje proekologiczne gospodarstw domowych, od nich bowiem zależy zgoda społeczeństwa na czasowe obniżenie ścieżki konsumpcji, co pozwoliłoby dostatecznie szybko zakumulować odpowiedni zasób kapitału fizycznego. Wydaje się zatem oczywiste, że przemiany świadomości społeczeństwa i walka z zakorzenionymi mitami¹⁶ jest niezbędną częścią przygotowań gospodarki do całkowitej rezygnacji z zasilania jej energią pocho-

¹⁶ Do takich mitów funkcjonujących w Polsce można zaliczyć np. przekonanie, iż produkcja energii z odnawialnych źródeł jest droga, bądź że posiadane przez Polskę, możliwe w eksploatacji złoża węgla kamiennego są bardzo duże.

dzącą z nieodnawialnych źródeł. Polityka gospodarcza nakierowana na takie, radykalne przecież, zmiany, musi zatem być poprzedzona działalnością informującą społeczeństwo o płynących z niej długookresowych korzyściach. Odpowiednie kampanie społeczne i informacyjne, konferencje o charakterze popularno-naukowym i inne podobne działania mogą wówczas przysłużyć się zmianie preferencji gospodarstw domowych na bardziej przyjazne produkcji energii ze źródeł odnawialnych. Należy zauważyć, że preferencje te nie zostały nigdzie wprowadzone jawnie do modelu, rząd bowiem nie musi ich brać pod uwagę przy podejmowaniu decyzji. W dobie demokratycznych rządów rząd powinien jednak, dla własnego dobra, liczyć się ze zdaniem społeczeństwa.

Należy również zauważyć, że nie zostało jednoznacznie określone, ile jednostek czasu rzeczywistego składa się na jeden „okres” w modelu. Innymi słowy, nie jest jasno zdefiniowany czas trwania transformacji gospodarki i akumulacji kapitału. W istocie, ów okres, oznaczany w modelu jako okres 0, może trwać dowolną, określoną przez rząd, długość czasu rzeczywistego, zależną od podjętych w tej kwestii decyzji polityki gospodarczej. Jeśli rząd sam ustali odpowiednio długi czas na przejście gospodarki na odnawialne źródła energii, to nakłady inwestycyjne przeznaczane na akumulację kapitału M mogą być odpowiednio mniejsze. Jakościowo jednak ich wysokość zależy od wszystkich czynników ujętych już w prezentowanym modelu. Długość trwania transformacji gospodarki nie zmienia zatem głównych wniosków płynących z przeprowadzonych analiz.

Oczywiście przedstawiony w niniejszym artykule model, jak każdy model ekonomii matematycznej, stanowi jedynie bardzo uproszczone odwzorowanie rzeczywistości, nieuwzględniające wielu specyficznych dla konkretnych gospodarek (a często też niemożliwych do skwantyfikowania) uwarunkowań – ich wyposażenia w zasoby naturalne, sytuacji geopolitycznej, stopnia rozwoju gospodarczego, tempa absorpcji nowych rozwiązań technologicznych, obowiązujących umów międzynarodowych i tym podobnych. Niniejszy artykuł nie miał jednak na celu zaprezentować modelu konkretnej gospodarki, w tym także gospodarki Polski, a jedynie dostarczyć pewien ogólny model, który może stanowić podstawę do dalszych, już zorientowanych na pewnej gospodarce, badań teoretycznych i empirycznych. Prezentowane w niniejszym artykule wnioski płynące z analiz należy zatem, podobnie jak w przypadku innych modeli ekonomii matematycznej, traktować jako ogólne wskazówki przy sformułowaniu polityki gospodarczej.

Zakończenie i podsumowanie

Niniejszy artykuł zawiera autorski model gospodarki, w której podjęta została decyzja o przejściu w całości na odnawialne źródła energii. Decyzja ta pociąga za sobą konieczność zakumulowania wystarczającej ilości kapitału fizycznego służącego do produkcji energii, by zaspokoić całkowity popyt gospodarki. Z drugiej strony, należy wziąć pod uwagę preferencje gospodarstw

domowych, które mogą różnie zapatrywać się na konieczność wahań ścieżki konsumpcji na rzecz zmiany struktury produkcji energii. Zaproponowany prosty model, uwzględniający te wybrane aspekty decyzji o zmianie źródeł energii, pozwala na wyznaczenie kilku warunków koniecznych, które gospodarka musi spełnić, by przejście na odnawialne źródła energii było możliwe.

Skonstruowany model nie jest oczywiście kompletny ani doskonały. Założono w nim, że decyzja o momencie T , w którym gospodarka zrezygnuje z nieodnawialnych źródeł energii, jest decyzją polityki gospodarczej, niekoniecznie optymalną. Może ona jednak być powodowana np. międzynarodowymi umowami bądź sytuacją gospodarczo-polityczną, w której dana gospodarka z różnych przyczyn się znalazła.

Dalsze badania autora w tym zakresie będą koncentrować się nad optymalnym z punktu widzenia rachunku ekonomicznego momentem przejścia na odnawialne źródła energii. W analizach tych uwzględniane będą wskazane w niniejszym artykule naturalne ograniczenia takiej decyzji, tj. dopuszczalne wahania ścieżki konsumpcji oraz konieczność akumulacji odpowiedniej ilości kapitału fizycznego.

Bibliografia

- Amigues J.P., Long N.V., Moreaux M. [2004], *Overcoming the Natural Resource Constraints Through Dedicated R&D Efforts: Contrasting the Non-Renewable and the Renewable Resource Economies*, "International Journal of Global Environmental Issues", no. 4 (1–3), s. 11–37.
- Burke P.J. [2010], *Income, Resources, and Electricity Mix*, "Energy Economics", no. 32(3), s. 616–626.
- Costantini V., Martini C. [2010], *The Causality between Energy Consumption and Economic Growth: A Multi-Sectoral Analysis using Non-stationary Cointegrated Panel Data*, "Energy Economics", no. 32(3), s. 591–603.
- Costanza R., Daly H.E. [1992], *Natural Capital and Sustainable Development*, "Conservation Biology", no. 6(1), s. 37–46.
- Dasgupta P., Heal G. [1974], *The Optimal Depletion of Exhaustible Resources*, "The Review of Economic Studies", no. 41(5), s. 3–28.
- da Silva A.S. [2008], *Growth with Exhaustible Resource and Endogenous Extraction Rate*, "Economic Modelling", no. 25(6), s. 1165–1174.
- Di Vita G. [2006], *Natural Resources Dynamics: Exhaustible and Renewable Resources, and the Rate of Technical Substitution*, "Resources Policy", no. 31(3), s. 172–182.
- Georgescu-Roegen N. [1979], *Energy Analysis and Economic Valuation*, "Southern Economic Journal", s. 1023–1058.
- Grimaud A., Rouge L. [2008], *Environment, Directed Technical Change and Economic Policy*, "Environmental and Resource Economics", no. 41(4), s. 439–463.
- Grimaud A., Rouge L. [2014], *Carbon Sequestration, Economic Policies and Growth*, "Resource and Energy Economics", no. 36(2), s. 307–331.

- Lin C.Y.C., Meng H., Ngai T.Y., Oscherov V., Zhu Y.H. [2009], *Hotelling Revisited: Oil Prices and Endogenous Technological Progress*, "Natural Resources Research", no. 18(1), s. 29–38.
- Maeda A., Nagaya M. [2012], *The Optimal Timing of the Transition to New Environmental Technology for Economic Growth*, "Modern Economy", no. 3(3), s. 263.
- Malaczewski M. [2014], *Zasoby naturalne, postęp techniczny a długookresowy wzrost gospodarczy*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Mosiño A. [2012], *Producing Energy in a Stochastic Environment: Switching from Non-Renewable to Renewable Resources*, "Resource and Energy Economics", no. 34(4), s. 413–430.
- Neustroev D. [2013], *The Uzawa-Lucas Growth Model with Natural Resources*, no. 52937, University Library of Munich, Germany.
- Pittel K., Bretschger L. [2010], *The Implications of Heterogeneous Resource Intensities on Technical Change and Growth*, "Canadian Journal of Economics/Revue Canadienne D'économique", no. 43(4), s. 1173–1197.
- Scholz C.M., Ziemes G. [1999], *Exhaustible Resources, Monopolistic Competition, and Endogenous Growth*, "Environmental and Resource Economics", no. 13(2), s. 169–185.
- Smulders S., De Nooij M. [2003], *The Impact of Energy Conservation on Technology and Economic Growth*, "Resource and Energy Economics", no. 25(1), s. 59–79.
- Solow R.M. [1974], *Intergenerational Equity and Exhaustible Resources*, "The Review of Economic Studies", no. 41(5), s. 29–45.
- Stern D.I. [2011], *The Role of Energy in Economic Growth*, "Annals of the New York Academy of Sciences", no. 1219(1), s. 26–51.
- Stern D.I., Cleveland C.J. [2004], *Energy and Economic Growth*, "Encyclopedia of Energy", no. 2, s. 35–51
- Stiglitz J. [1974], *Growth with Exhaustible Resources: Efficient and Optimal Growth Paths*, "Review of Economic Studies", symposium volume, s. 123–137.
- Stuermer M., Schwerhoff G. [2013], *Technological Change in Resource Extraction and Endogenous Growth*, "Bonn Econ Discussion Papers", no. 12.
- Tahvonen O., Salo S. [2001], *Economic Growth and Transitions Between Renewable and Nonrenewable Energy Resources*, "European Economic Review", no. 45(8), s. 1379–1398.
- Tokarski T. [2011], *Ekonomia matematyczna. Modele makroekonomiczne*, PWE, Warszawa.
- van Zon A., Yetkiner I.H. [2003], *An Endogenous Growth Model with Embodied Energy-saving Technical Change*, "Resource and Energy Economics", no. 25(1), s. 81–103.

CONDITIONS FOR THE TRANSITION OF AN ECONOMY TO RENEWABLE ENERGY SOURCES

Abstract

The gradual depletion of non-renewable resources is a fact. Such resources are used in the production process not only as a material, but also as the main energy source. The purpose of this paper is to make a comprehensive analysis of conditions for the transition of an economy to renewable energy sources. The analysis is conducted with the use of a simple mathematical model of the economy, taking into account the complementarity of energy and physical capital. The decision to switch to renewable energy sources is treated solely as an economic policy decision in the model. The necessary conditions are derived for an economy to give up non-renewable energy sources at a fixed point in the future. These conditions include a specific level of ecological preferences of society, low energy-intensiveness of physical capital, and a sufficient stock of natural energy resources.

The paper is theoretical in its nature. It establishes the influence of various macroeconomic aspects on the implementation of an intended economic policy.

Keywords: non-renewable natural resources, renewable sources of energy, complementarity between natural resources and physical capital

JEL classification codes: Q42, Q43, Q48
