

Jacek MALKO*

Ekonomia niskiej stabilizacji emisji

STRESZCZENIE. W artykule dokonano przeglądu modeli 3E (energia, ekonomika, środowisko), oceniając techniczną wykonalność i ekonomiczną zasadność dla osiągnięcia celu niskiego poziomu stabilizacji emisji gazów cieplarnianych przy umiarkowanych kosztach. Analiza pięciu rozważanych modeli wykazała, że utrzymywanie przyrostu średniej globalnej temperatury na poziomie 2°C poniżej wartości dla ery przedprzemysłowej w sposób zasadniczy zależy od dostępności poszczególnych technologii oraz uwarunkowań politycznych i instytucjonalnych. Wszystkie modele zakładają udział w polityce klimatycznej wszystkich państw w wymiarze globalnym i transfer technologii pomiędzy regionami.

SŁOWA KLUCZOWE: model, energia, ekonomika, środowisko, emisja, niski poziom, cel stabilizacyjny

Wprowadzenie

Polityka energetyczna Unii Europejskiej, sformułowana w czołowym dokumencie pakietu energetycznego ze stycznia 2007 r., sprowadzana jest często do triady celów „3 x 20 do 2020 r.” Istnieje tu zasadnicza zgodność z celem, zadeklarowanym przed laty przez Konwencję ramową ONZ w sprawie zapobiegania zmianom klimatycznym (UNF CCC, 1992) jako „stabilizacja koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze na poziomie, który powinien zapobiegać niebezpiecznemu oddziaływaniu emisji antropogenicznych na system

* Prof. dr inż. hab. inż. – Politechnika Wroclawska, Instytut Energoelektryki, Wrocław.

klimatyczny”. W interpretacji komisji Europejskiej przyjęto, iż oznacza to osiągnięcie do końca obecnego okresu stabilności klimatycznej przy przyjęciu temperatury na poziomie nie wyższym niż 2°C w odniesieniu do wartości odnotowanych w początkach ery industrialnej. Oznacza to, że stężenie GHG musi zostać ograniczone do co najwyżej 450 ppm równoważnego CO₂ (z prawdopodobieństwem 50%). Konieczne staje się wytypowanie całego pakietu opcji dla zdecydowanej redukcji emisji i podjęcia działań już od zaraz. Drogi realizacji celu „2°C” muszą nie tylko spełniać warunek technicznej wykonalności, ale również dopuszczalności z punktu widzenia ekonomiki i akceptowalności przez interesariuszy i decydentów politycznych w skali globalnej. Konieczne jest przyjęcie podejścia multimodelowego.

Odpowiedzi wymagają dwie kluczowe kwestie:

- ✧ Jakie są techniczne i gospodarcze konsekwencje różnych ścieżek dojścia do celu „2°C”.
Możliwe jest np. przyjęcie, iż cel ten może być osiągnięty przy trzech różnych scenariuszach stabilizacji równoważnika CO₂ na poziomach 550, 450 i 400 ppm CO₂ eq. Prawdopodobieństwa osiągnięcia celu 2°C zwiększają się wówczas odpowiednio od około 20%, przez 50% do 80% zgodnie z danymi przytoczonymi w [1].
- ✧ Jakie występują bariery techniczne, ekonomiczne lub polityczne, utrudniające realizację idei stabilizacji klimatu? Jakie mogą być skutki niepowodzenia we wdrażaniu pewnych technologii, uznawanych za niezbędne w realizacji założonego celu emisyjnego (w rodzaju masowego wytwarzania biomasy lub CCS). Innym problemem może być przyszłość energetyki jądrowej z uwagi na stopień ryzyka i efekty uboczne.

Dla znalezienia odpowiedzi na te kwestie wykorzystano pięć globalnych modeli typu energia – ekologia – ekonomika (3E), będących rezultatem projektu ADAM (strategia adaptacji i ograniczenia, wspierającego europejską politykę energetyczną [2]). W raporcie AR4 Międzynarodowego Panelu ds. Zmian Klimatycznych [3] przedstawiono rezultaty uzyskane dla trzech modeli, oddających skutki jedynie 6 spośród 177 scenariuszy ograniczenia emisji dla zakresu stężeń 445–490 ppm CO₂ eq. Liczne inne doniesienia literaturowe z lat 2007–2010 (np. [4–7]) relacjonują o próbach stosowania modeli, sprawdzających się w specyficznych warunkach „celu stabilizacji na niskim poziomie” (*low stabilization target*). Badaniami porównawczymi objęto modele, zaprezentowane w projekcie Adam [2]: MERGE [8], REMIND [9], POLES [10], TIMER [11] oraz E3MG [11]. Charakterystyka tych narzędzi (Tab. 1) jest następująca:

MODELE MERGE, rozwijany od roku 2003 [8] zakłada dezagregację gospodarki światowej na 9 regionów i modelowanie z kombinowaną zasadą łączenia podejścia *top-down* według Ramseya z inżynierskim modelowaniem *bottom-up* przy uwzględnieniu prostego modelu klimatycznego i ekonomiki wymiany międzynarodowej. W skali regionów proces uczenia się technologii wraz z globalnym ich upowszechnieniem wzmacnia więzi wewnątrzregionalne i interakcje. Model MERGE bezpośrednio uwzględnia technologie wytwarzania energii elektrycznej (łącznie z opcjami CCS) oraz wytwarzanie nośników uszlachetnionych (paliwa syntetyczne z węgla i biomasy, wodór z różnych paliw pierwotnych). Proces uczenia się technologii jest reprezentowany przez dwuparametryczne krzywe w funkcji kosztów inwestycyjnych technologii. Ograniczeniem proponowanego modelu jest zakładanie, że przyjmuje on doskonałą konkurencyjność i informacje, ciągłość funkcji

produkcja vs. funkcja użyteczności, reprezentatywny zbiór uczestników itp. Niski poziom szczegółowości danych o technologiach sprawia również, że uwzględniana jest jedynie pośrednio reprezentacja efektywności energetycznej użytkownika końcowego, gdyż nie są reprezentatywne *explicite* technologie *end use*.

MODEL REMIND jest globalnym odwzorowaniem multiregionalnym z etapową optymalizacją energia/środowisko, przy czym maksymalizowana jest funkcja globalnego dobrobytu w warunkach równowagi na różnych rynkach. Jest to model hybrydowy, łączący model wzrostu gospodarczego z modelami podsektorów energii i prostym modelem klimatycznym poprzez łączy sztywne. Podstawową zaletą takiego podejścia jest wysoka rozróżnialność technologii systemu zaopatrzenia w energię, uwzględniająca ponad 50 technologii konwersji i zmienne w czasie relacje pomiędzy 11. regionami świata. Modelowana jest światowa wymiana w zakresie węgla, ropy naftowej, gazu, uranu oraz pewnych produktów, a także obrót pozwoleniami na emisje. Wyjście makroekonomiczne jest określone jako produkcja w funkcji nakładu robocizny, kapitału i wybranych typów energii w użytkowaniu końcowym. Zmiana udziału poszczególnych technologii energetycznych w wolumenie produkcji jest kluczowym elementem endogenicznych zmian w technologiach, uwzględnianych przez model. Uzupełnieniem modelu są efekty krzywych uczenia, wpływające na koszty inwestowania w źródła wiatrowe i solarne. Opierając się na dokładnych ocenach foresight'owych uzyskuje się rozwiązanie najlepsze, jednak model nie jest zdolny do uwzględnienia niedoskonałości mechanizmów rynkowych i traktuje zmiany w technologiach jak wynik egzogeny w ujęciu makroekonomicznym.

MODEL POLES jest globalnym modelem sektorowym światowego systemu zaopatrzenia w energię, opartym na zhierarchizowanej strukturze połączonych submodeli na poziomie międzynarodowym, regionalnym i narodowym. Model poszukiwania równowagi cząstkowej rozważany jest w rocznych krokach drogą symulacji rekursywnej. Uwzględniane są ceny energii w obrocie międzynarodowym jako zmienne endogeniczne, a relacje popytowo-podażowe uwzględniają charakterystyczne przesunięcia czasowe tych procesów w skali regionów geopolitycznych świata. Model zapewnia bilansowanie energii dla 47. krajów i regionów, w tym kluczowych państw OECD. Szczegółowo uwzględnione są niektóre sektory energetyczne systemu globalnego: od sektora dostaw energii pierwotnej do modułów popytowych (przemysł, transport, usługi.....), co stanowi istotną zaletę modelu. Ograniczenie modelu polega na uwzględnieniu jedynie stosowanych aktualnie lub dostatecznie dokładnie opisywanych rozwojowych technologii energetycznych, co w dalszej perspektywie czasowej (np. roku 2100) może być źródłem istotnych błędów metody.

MODEL TIMER (zwany również Zintegrowanym Modelem Oceny Globalnej – IMAGE) opisuje i ocenia procesy inwestycyjne i eksploatacyjne dla różnych opcji technologicznych drogą symulacji. Rola uwzględnianych opcji zależy od postępu technologicznego (uczenie się technologii) oraz wyczerpywania zasobów kopalnych. Model uwzględnia tendencje długoterminowe w skali globalnej w odniesieniu do zapotrzebowania na energię, zmian technologicznych, substytucji źródeł oraz polityki klimatycznej. Substytucja w obrębie nośników energetycznych oparta jest na metodzie *input-output*, a nawet oddaje zmiany w użytkowaniu gruntów i wynikające stąd zmiany emisji GHG, a także skutki dla ekosystemów naturalnych i produkcji rolnej. Uwzględniane są również wymiany CO₂

między ekosystemami lądowymi i atmosferą. Szczególne zalety wykazuje TIMER/IMAGE w szczegółowym opisie technologii energetycznych geografii użytkowania gruntów. Godne uwagi jest zawarcie w jednym modelu procesów wykorzystywania gruntów i energii, wadą natomiast jest traktowanie rozwoju gospodarczego jako czynnika o charakterze egzogenicznym, co powoduje, że zmiany w sektorze energii i użytkowania gruntów nie są powiązane ze zmianami PKB.

MODEL E3MG jest makroekonomicznym symulacyjnym modelem hybrydowym w warunkach nierównowagi globalnego systemu 3E (Energia, Ekonomia, Środowisko), którego parametry oszacowano na bazie statystyki lat 1971–2002. Model stosowany jest dla prognozowania na rok 2030 oraz z krokiem 10. letnim projekcji do roku 2100. Podstawą modelu jest koncepcja „New Economics” dynamiki długoterminowej oraz „postkeynesizm” w historycznym podejściu do skumulowanych potrzeb i wzrostu pobudzanego przez popyt. Model zakłada również stan niezrównoważenia, według którego miejsca pracy, wymiana międzynarodowa i rynki finansowe nie pozostają w równowadze, lecz cechują się deficytem lub nadmiernością w gospodarce otwartej w zależności od punktu czasowego i regionu. Zastosowano symulację technologii energetycznych *bottom-up*, umożliwiającą uwzględnienie 28. technologii. Model ma cechy pozwalające na modelowanie przepływów dwukierunkowych w obszarach gospodarki, popytu/podaży energii oraz emisji antropogenicznych. Wadą modelu jest nieuwzględnienie możliwych zmian wartości parametrów, ocenianych na podstawie szeregów czasowych z 32. krajów, z 32-letniej historii procesów.

Poziom stabilizacji w sposób zasadniczy zależy od założeń dostępności technologii (np. [5]). Przegląd specyficznych cech technologii porównywalnych modeli zestawiono w tabeli 1 i 2 za [12]. Dla wszystkich modeli przewidziano całkowitą szczelność magazynów CO₂, przy czym niektóre modele zakładają ograniczoną zdolność magazynowania w formacjach geologicznych. Także niemal wszystkie modele zakładają potencjał produkcji biomasy 200 EJ/rok jako wartość odniesienia, wyjątkiem jest model TIMER, który dla scenariusza 400 ppm przyjmuje wartość 290 EJ/rok. Pominięto też wartość emisji skojarzonych z wykorzystaniem biomasy (np. przy zastosowaniu nawożenia).

TABELA 1. Cechy modeli używanych w Projekcie ADAM

TABLE 1. Classification of the models participating in the ADAM Model Comparison

| Model | Klasa modeli | Podejście | Funkcja celu |
|-----------------|--|--|---|
| MERGE REMIND | Model równowagi ogólnej w przedziałach czasowych | Optymalizacja przy doskonałych prognozach w całym zakresie | Maksymalizacja dobrobytu |
| POLES TIMER | Model systemu energetycznego | Dynamiczne rekursywne | Minimalizacja kosztu |
| E3 MG | Ekonometryczny model symulacyjny | Problem wartości początkowej, ograniczona prognoza | Bez funkcji celu (zależność od zapotrzebowania) |

Źródło: The Economic... [12]

TABELA 2. Specyficzne założenia modelu w obrębie systemu zaopatrzenia w energię

TABLE 2. Overview over specific model assumption within the energy system

| Model Technologia | MERGE | REMINd | POLES | TIMER | E3MG |
|-------------------------|---|---|--|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Technologie CCS | Wiele możliwości CCS dla węgla, gazu i biomasy. Całkowite zapotrzebowanie magazynowe 400 Gt C | Wiele możliwości CCS dla węgla, gazu i biomasy. Bez ograniczeń magazynowania | Wiele możliwości CCS dla węgla, gazu i biomasy. Bez ograniczeń magazynowania | Wiele możliwości CCS dla węgla, gazu i biomasy (w scenariuszu 400 ppm dopuszczalna tylko biomasa). Całkowite zapotrzebowanie magazynowe 1500 GtC | CCS dla węgla i gazu, bez opcji CCS+biomasa. Bez ograniczeń magazynowania |
| Węglowe | Energia elektryczna, ciepło, zgazowanie, upłynianie, paliwa stałe | Energia elektryczna, ciepło zgazowanie, upłynianie, paliwa stałe | Energia elektryczna, upłynianie, paliwa stałe | Energia elektryczna, ciepło, paliwa stałe | Energia elektryczna ze wskazaniem technologii, ciepło (wskazania częściowe), zgazowanie, upłynianie (wartości determinowane przez popyt) |
| Zasoby odnawialne (OZE) | Krzywe uczenia Solarne (PV) postęp 10% Wiatrowe 5% | Krzywe uczenia Fotowoltaika postęp 20% Wiatrowe 10% zmienny w czasie PV od 20% w 2010 do 4% w 2050 Solarne wielkoskalowe 30% w 2010 3% w 2050 Wiatrowe 14% w 2010 5% w 2050 | Krzywe uczenia PV 20% Wiatrowe 10% | Krzywe uczenia PV 35% (2000) 5% (2100) Wiatrowe 28% (2000) 8% (2100) | Krzywe uczenia solarne i wiatrowe 30% |

TABELA 2 cd.

TABLE 2 cont.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------|--|--|--|--|---|
| Biomasa | Różne opcje wykorzystywania biomasy (upłynianie, zgazowanie, kogeneracja, biopaliwa...) Zasadnicze wykorzystywanie do produkcji energii elektrycznej | Różne opcje wykorzystania biomasy (upłynianie, zgazowanie, kogeneracja, biopaliwa...) oraz opcja biomasa+CCS w scenariuszu odniesienia – głównie do produkcji biopaliw, w scenariuszu ograniczenia – głównie do produkcji wodoru. Bez możliwości wykorzystywania biomasy do produkcji energii elektrycznej | Biomasa wykorzystywana głównie w kogeneracji i użytku bezpośrednim. Dwa rodzaje biomasy: „uprawy energetyczne” dla biopaliw I. generacji i „biomasa drzewna” wykorzystywana w transporcie i w innych zastosowaniach (bezpłodnie, w kogeneracji i produkcji wodoru) | Różne opcje wykorzystywania biomasy (upłynianie, zgazowanie, biopaliwa...) Głównie zastosowania: upłynianie i produkcja energii elektrycznej. Piony upraw energetycznych: kukurydza, trzcina cukrowa, drewno. Przetwarzanie drewna na paliwa stałe lub biopaliwa z generacji | Modelowana jako technologia do produkcji energii elektrycznej oraz kogeneracji. Odpady palne jako nośnik energii dla wytwarzania ciepła w sektorze mieszkaniowym. Biopaliwa nie uwzględnione w modelu |
| Wodór | Wodór wytwarzany w technologiach jądrowych, termicznych solarnych. Wodór +CCS dla węgla, gazu i biomasy | H ₂ +CCS dla węgla, gazu i biomasy | H ₂ z technologii termicznych solarnych i jądrowych. H ₂ +CCS możliwe dla węgla, gazu i biomasy | H ₂ z technologii termicznych solarnych. H ₂ +CCS możliwe dla węgla, gazu i biomasy | H ₂ z węgla i gazu. Bez uwzględnienia opcji H ₂ +CCS |
| Inne | | | Duża szczegółowość modelowania strony popytowej (np. pojazdy, budynki....) Wzorce konsumpcji w ujęciu ekonomicznym | Pojazdy samochodowe zasilane wodorem | Duża szczegółowość modelowania strony popytowej (np. samochody „plug-in”... Środki uzyskiwane z aukcji pozwolęń na emisję |

Źródło: The Economics of Low Stabilization [12]

Wszystkie modele przyjmują założenia o dynamice procesu uczenia technologii. Pewne doniesienia literaturowe (np. [13]) wskazują na systematyczne przeszacowanie tej dynamiki i preferowanie pewnych technologii w modelach optymalizacyjnych.

1. Scenariusz i metody

Scenariusz odniesienia (*baseline*)

W scenariuszu nie uwzględniającym polityki klimatycznej dążono w miarę możliwości do zachowania istotnych parametrów wejściowych zgodnie z założeniami przyjętymi w porównywalnych modelach i dotyczy to w szczególności czynników demograficznych i wzrostu gospodarczego. Stąd też za wyjściowy uznano scenariusz odniesienia z projektu ADAM jako *baseline* w stosunku do efektów prowadzenia polityki klimatycznej; przyjęto przy tym, iż polityka klimatyczna nie wpływa w sposób decydujący na gospodarkę i sferę socjalną.

Na skutek istotnie różniących się założeń poszczególnych modeli nie jest możliwa pełna harmonizacja wszystkich zmiennych dla modeli wybranych. Natomiast wszystkie one wykonują te same projekcje ONZ [14] dla danych egzogenicznych o populacjach globalnej i regionalnych. Dane ekonomiczne odnoszą się do scenariusza średniego wzrostu. Modele POLES i TIMER wykorzystują egzogenne dane o produkcie brutto (PGB, PRB), stosują je bezpośrednio jako dane na wejściu. Mimo, iż modele stosują te same wartości początkowe o produkcie brutto jak dla wartości funkcji w scenariuszu odniesienia (*baseline*) oraz te same wartości zużycia energii i emisji CO₂ dla roku wyjściowego 2000, występują różnice wartości prognozowanych na przyszłość. Wynikać to może z istotnych różnic cen nośników kopalnych, zakładanych odmiennie w poszczególnych modelach, co wpływa na strukturę paliw pierwotnych i emisję dla scenariusza odniesienia. Przykładowo, w modelu MERGE wzrost emisji jest znacząco wyższy niż dla innych modeli, co wynika z założonych niskich cen paliw kopalnych i zachęca do kontynuacji korzystania z węgla, gazu i ropy naftowej. Odmiennie zachowuje się model REMIND, dla którego ścieżka niskich emisji CO₂ wynika z założenia wysokich kosztów paliw kopalnych, co z kolei powoduje preferencję dla OZE. Model E3MG przewiduje zwiększoną penetrację OZE w scenariuszu *baseline* w dalszych korytarzach czasu, co skutkuje niewielkim obniżeniem rocznych emisji CO₂ po roku 2006.

Wszystkie scenariusze rozważano w okresie lat 2000–2100, a wyniki odnoszą się do obszarów krajów i regionów. Przyjęto podział na siedem obszarów geopolitycznych z agregacją globalną: ŚWIAT, Chiny, Rosja, Europa (27), Indie, Laponia, USA oraz reszta świata ([15–19]).

Scenariusz ograniczania emisji: cele długoterminowe

Przeprowadzono analizę wyróżnionych celów redukcji emisji o różnych prawdopodobieństwach osiągnięcia celu „2°C”. Rozważano scenariusze 550, 450 i 400 ppm stężenia ekwiwalentnego CO₂ co odpowiada klasyfikacji według IPCC: od „nieprawdopodobne” przez „umiarkowanie prawdopodobne” do „prawdopodobne” w odniesieniu do granicznego przyrostu temperatury 2°C. Dane dla tych trzech scenariuszy emisji CO₂ z sektora przemysłowego i energetycznego emisji z użytkowanych gruntów oraz innych gazów cieplarnianych (GHG) pochodzą z modelu IMAGE/TIMER [20]. Stosowane modele cechują się różnorodnymi ograniczeniami (patrz tab. 3), a cel do osiągnięcia monitorowany jest od roku 2010. W przypadkach, gdy stosuje się ścieżkę egzogenną IMAGE/TIMER (np. dla danych o emisjach z użytkowanych gruntów w modelu REMID) ścieżka redukcji emisji równoważnika CO₂ jest zgodna z danymi pozyskiwanymi z modelu IMAGE/TIMER.

TABELA 3. Ograniczenia celu stabilizacji emisji CO₂ oraz uwzględnienie emisji innych gazów cieplarnianych oraz emisji z obszarów upraw

TABELE 3. Constraints concerning the stabilization target and treatment of another GHGs and land-use emissions

| Model | Ograniczenie CO ₂ | Inne opcje | Emisje z obszarów upraw |
|--------|--|--|-------------------------|
| MERGE | Ważny moduł klimatyczny | Ograniczenie emisji z wykorzystaniem krzywych kosztów krańcowych | Egzogenne (IMAGE/TIMER) |
| REMIND | Emisje CO ₂ sektora przemysłu i energii | Egzogenne (IMAGE/TIMER) | Egzogenne (IMAGE/TIMER) |
| POLES | Emisje CO ₂ z sektora przemysłu i energii | Ograniczenie emisji z wykorzystaniem krzywych kosztów krańcowych | Egzogenne (IMAGE/TIMER) |
| TIMER | Wszelkie emisje gazów cieplarnianych jako równoważne CO ₂ łącznie z gazami w protokole z Kioto i emisjami z użytkowania gruntów | Ograniczenie emisji z wykorzystaniem krzywych kosztów krańcowych | Endogenne |
| E3MG | Skumulowane emisje CO ₂ na rok 2100 | Egzogenne (IMAGE/TIMER) | Egzogenne (IMAGE/TIMER) |

Źródło: The Economisc ... [12]

2. Rezultaty

Uwagi o porównywalności modeli

Porównano mechanizmy i interakcje, kształtujące strategię porównawczą (*baseline*) oraz strategię osiągnięcia celu stabilizacyjnego 550 i 400 ppm równoważnika CO₂. Aczkolwiek zachowano spójność danych dla czynników demograficznych, produktu brutto, całkowitego zużycia energii i emisji CO₂, to modele prowadziły do odmiennych strategii zaspokajania przyszłościowych potrzeb energetycznych i promowały odmiennie nośniki energii i technologie. Także odmiennie były czynniki sprawcze (*drivers*), kształtujące zachowanie modeli – np. ceny paliw kopalnych, współczynniki uczenia się technologii i pojawienie się przełomowych technologii. Podstawową zatem cechą analizy porównawczej modeli jest to, iż możliwe jest zidentyfikowanie założeń, prowadzących do różnych trajektorii i struktur nośników/technologii w scenariuszach odniesienia i ograniczenia emisji. Swoistą zaletą zastosowanego podejścia jest możliwość wykorzystania scenariusza *baseline* do zrozumienia i analizy zachowań modelu przed rozważaniem kosztów dodanych i wyzwań technologicznych dla procesu ograniczenia emisji.

Modelowanie zdekarbonizowanego świata

Pierwszym istotnym wynikiem analizy ścieżek ograniczenia emisji jest stwierdzenie, że każdy z modeli umożliwia osiągnięcie trzech celów stabilizacyjnych, nawet dla stężenia CO₂ równoważnego na poziomie restrykcyjnych 400 pp. Jednakże niektóre z rozważanych modeli muszą przyjmować szerszy zakres (*portfolio*) technologii niskowęglowych (np. CCS + węgiel, CCS + biomasa) dla ułatwienia zdolności do ograniczenia emisji i osiągnięcia założonego poziomu tych emisji.

Zostało wykazane, że każdy model w istocie oddaje poszczególną ze strategii w porównaniu z innymi modelami: modele MERGE i E3MG preferują zasadniczo technologie, wykorzystujące zasoby odnawialne, TIMER – technologie CCS, POLES – efektywność energetyczną, zaś REMIND – technologie CCS, ale w połączeniu z biomasą. Widać więc, że wynikająca z analiz struktura nośników jest w zasadzie funkcją założeń każdego z modeli odnośnie do dostępu technologii, postępu krzywych uczenia oraz cen zasobów energetycznych. Nieco odmiennie zachowuje się jedynie model MERGE, który wykazuje większą nieczułość na zmiany strukturalne w zakresie poziomów stabilizacyjnych. Elastyczność modelu wynika z zastosowania własnego modułu klimatycznego i niezależności od wstępnie zdefiniowanej ścieżki redukcji CO₂. Tak więc można pominąć transformację sektora w przypadku mniej restrykcyjnych celów emisyjnych, oczekując preferencji dla dużych podstawowych opcji: OZE i biomasy. Dla zaostrzonych wartości ograniczeń emisyjnych szczególnie ważne okazują się opcje produkcji wodoru w instalacjach solar-nych wysokotemperaturowych dla użytkowania odmiennego niż wytwarzanie energii

elektrycznej. Również ważną rolę odgrywa postęp w zakresie efektywności wykorzystywania energii elektrycznej.

W modelach TIMER, POLES i REMIND opcja wykorzystania surowców kopalnych bez CCS daje podobne rezultaty, gdyż ścieżka redukcji emisji ograniczona jest przez egzogenne szeregi czasowe dla emisji CO₂. Udział technologii niskowęglowych w strukturze nośników odróżnia jednak poszczególne modele:

- ✧ Model POLES: istotny jest czynnik ograniczenia użytkowania energii, gdyż odwzorowana jest poprawa efektywności po stronie popytowej w ujęciu *bottom-up*. Ogólnie biorąc zwiększenie cen nośników może pobudzić ulepszenie technologii, co prowadzi do oszczędności w produkcji energii i powoduje ponadto zmiany behawioralne, np. w sektorze mieszkalnictwa i transportu. Tempo takich przemian jest jednak umiarkowane z uwagi na znaczą inercję sektora energetycznego.
- ✧ Model TIMER za podstawową opcję przyjmuje CCS+węgiel zaś CCS+biomasa pojawia się przy realizacji bardziej restrykcyjnych wariantów stabilizacji. Pojemność magazynowania CO₂ przyjmowana jest na 520 GtC (w modelu MERGE – 280 GtC). Mimo znacznego postępu (krzywe uczenia) technologie OZE są zbyt kosztowne dla odgrywania znaczniejszej roli w scenariuszach ograniczeń emisji.
- ✧ Model REMIND wykazuje stały wzrost wykorzystywania paliw pierwotnych, gdyż dekarbonizacja jest możliwa przy umiarkowanych kosztach CCS i zasobów odnawialnych. Z uwagi na te koszty mniejszą rolę odgrywa poprawa efektywności energetycznej, reprezentowana w modelu przez podejście *top-down*. Opcją o zasadniczym znaczeniu jest połączenie wykorzystania biomasy wraz z CCS. Wykorzystanie biomasy cechuje się znaczą elastycznością, a przetwarzanie tego nośnika zachodzi zasadniczo do H₂ dla celów transportu, odmiennie niż w scenariuszu odniesienia, zakładającym upłynnienie biomasy.
- ✧ Model E3MG zakłada wzrost znaczenia OZE wraz z przejściem od scenariusza stężenia 550 ppm do 400 ppm. Dla najbardziej restrykcyjnego wariantu (400 ppm) podstawową opcją jest zwiększenie efektywności energetycznej przez stosowanie technik DSM. Stworzone są bodźce dla wzrostu efektywności w sektorze mieszkaniowym i artykułach gospodarstwa domowego (AGD). Co więcej, polityka regulacyjna zachęca do dekarbonizacji sektora transportu na drodze rozpowszechniania napędu elektrycznego. Dla scenariusza 400 ppm coraz większego znaczenia nabierają opcje OZE oraz makroekonomiczny efekt mnożnikowy, który kreuje dodatkowe miejsca pracy w zakresie wykorzystywania zasobów, wchodzących bądź nie wchodzących do struktury nośników w scenariuszu odniesienia, a koszty generowane przez OZE są znacząco ograniczone. Sprzyja to wykorzystywaniu w większej skali technologii niskowęglowych. Szczególnie godne uwagi są spostrzeżenia następujące:
- ✧ Dla pewnych modeli energetyka jądrowa ma znaczenie jako tymczasowe źródło energii w połowie bieżącego stulecia. W większości modeli udział energii nuklearnej w strukturze wykorzystywania zasobów wzrasta aż do roku 2050, a później (przynajmniej w niektórych scenariuszach) maleje częściowo na skutek wyczerpywania się złóż uranowych.
- ✧ W modelach POLES i REMIND, a w mniejszym stopniu również w modelach TIMER i MERGE, całkowity potencjał CCS wykazuje pewne zmiany wraz z celem stabilizacji

emisji. Dla celów bardziej restrykcyjnych CCS występuje raczej w połączeniu z biomasą niż z paliwem węglowym, co wynika z faktu, iż przejmowanie węgla z atmosfery („emisja ujemna”) jest możliwe przez połączenie biomasa+CCS. Dla scenariusza 550 ppm nie jest konieczne wprowadzenie „emisji ujemnej”, zatem możliwe jest zastosowanie kombinacji: paliwa węglowe i gazowe + CCS.

- ✧ W porównaniu ze scenariuszem odniesienia wykorzystanie paliw ropopochodnych ulega zmniejszeniu, ale efekt ten nie jest jednakowy dla wszystkich modeli – od umiarkowanego dla TIMER po bardzo znaczący (E3MG). Pozycja ropy naftowej w sektorze transportu jest nadal dominująca i utrzyma się do końca stulecia, odbijając się na wartości emisji CO₂.

Koszty

Wyróżnić można różne typy kosztów, związanych z ograniczeniem emisji CO₂. Są to bezpośrednie koszty technologii, koszty w odniesieniu do specyfiki sektora, koszty makroekonomiczne i koszty związane z pojęciem dobrobytu. Analizy kosztowe, przeprowadzone w [20] dają się podsumować przez następujące stwierdzenia: „Pomimo bardzo odmiennych założeń i struktur, stosowanych w rozważanych modelach, cztery spośród pięciu ocenianych wykazywało podobne cechy w zakresie kosztów. Globalne koszty ograniczeń mieściły się w ograniczonym przedziale, chociaż model E3MG, oparty na keynesowskim modelu symulacyjnym wykazał korzyści, wynikające z ograniczenia zmian klimatycznych. Pobieżne oszacowania, zakładające niezależności od struktury nośnikowej i zastosowanych technologii, wykazały, że globalne koszty ograniczeń emisji będą raczej umiarkowane, jeżeli dostępny będzie pełny zakres technologii i jeżeli powszechny będzie udział państw i ugrupowań regionalnych w realizacji tego celu. Analizy wskazują, iż regionalne koszty ograniczeń są bardziej zróżnicowane” [12].

Dalsze analizy skupiały się na ocenie roli poszczególnych technologii w związku z wybranymi modelami, co znajduje podsumowanie w tabeli 4.

Podstawowe wnioski są następujące:

- ✧ Koszty ograniczenia emisji mogą wzrosnąć znacząco, gdy nie są dostępne pewne opcje technologiczne lub gdy ich potencjał jest znacząco niższy od założenia. W pewnych przypadkach wybór kolejnego najlepszego założenia może spowodować niewykonalność procesu osiągania celu niskiej stabilizacji. Prowadzi to do wniosku, że elastyczność, polegająca na substytucyjności technologii, może nie wystąpić w przypadku skrajnie restrykcyjnego celu niskiej stabilizacji emisji.
- Ranking opcji dla modeli i dwóch scenariuszy ograniczeń wykazuje pewne nieprawidłowości.
- ✧ OZE i CCS są najważniejszymi technologiami dla ograniczeń emisji, ponieważ bez ich zastosowania cel 400 ppm jest nieosiągalny, a cel 550 ppm jest bardzo kosztowny.
- ✧ Wariant jądrowy jest mniej istotny z uwagi na to, że cel 400 ppm jest osiągalny bez tej opcji, a koszt osiągnięcia obydwu celów ograniczeń nieznacznie wzrasta przy utrzymaniu opcji w scenariuszu *baseline*.
- ✧ Potencjał biomasy dominuje w kosztach niskiej stabilizacji emisji.

TABELA 4. Opcje technologiczne i czułość scenariuszy dla stężeń 550 i 400 ppm

TABLE 4. Technology options and sensitivity scenarios for the 550 ppm and 440 ppm

| Określenie scenariusza | Opis | MERGE | REMIND | POLES |
|---|--|-------|--------|-------|
| Wszystkie opcje 550 ppm 400 ppm | Wszystkie opcje, nieograniczony potencjał CCS, potencjał biomasy ograniczony do 200 EJ/rok | +/+ | +/+ | +/+ |
| Bez OZE 550 ppm 400 ppm | Inwestycje w OZE (z biomasą) ograniczone do poziomu wartości w scenariuszu odniesienia (<i>baseline</i>) | +/- | +/- | +/- |
| Bez CCS 550 ppm 400 ppm | Zakres CCS ograniczony do wartości scenariusza odniesienia (zero) | +/- | +/- | +/- |
| Bez energetyki jądrowej 550 ppm 400 ppm | Zakres e.j. ograniczony do wartości dla scenariusza odniesienia | +/+ | +/+ | +/+ |
| Biomín 550 ppm 400 ppm | Potencjał biomasy ograniczony do 100 EJ/rok | +/+ | +/+ | +/- |
| Biomax 550 ppm 400 ppm | Potencjał biomasy ograniczony do 400 EJ/rok | +/+ | +/+ | +/+ |
| CCS min 550 ppm 400 ppm | Potencjał magazynowania CO ₂ ograniczony do 12 GtC | 0/+ | 0/+ | 0/+ |
| Wstrzymanie energ. jądrowej 550 ppm 400 ppm | Bez inwestycji w źródła jądrowe od 2000 r. | +/+ | +/+ | +/+ |
| FBR 550 ppm 400 ppm | Opcja reaktora powiadającego | +/+ | +/+ | 0/0 |

Technologiczna wykonalność strategii niskiej stabilizacji

Dla poziomu stężenia CO₂, wynoszącego 550 ppm, badane modele umożliwiają wykorzystanie w sposób elastyczny szerokiego zakresu technologii, uzupełniających lub zastępujących scenariusz odniesienia. Ta elastyczność w zakresie technologii zanika w pewnym stopniu dla przypadku niskiego poziomu stabilizacji, dla którego niektóre z technologii są niedostępne dla osiągnięcia celu polityki energetycznej OZE (hydroenergetyka, energetyka solarna i wietrzna). CCS i biomasa stanowią jeden rodzaj opcji, różniących się od działań po stronie popytowej (DSM) i odgrywają razem zasadniczą rolę w dążeniu do niskiego poziomu stabilizacji CO₂.

Odnosnie wyboru technologii analizowane modele zachowują się podobnie, umożliwiając stworzenie wstępnej listy rankingowej, przyjmującej kryterium kosztowe. Najbardziej preferowane okazały się technologie biomasy i inne OZE oraz CCS. Bez nich niski pułap stężenia (400 ppm) nie jest osiągalny.

Założony potencjał biomasy w znacznym stopniu determinuje koszty spełnienia celów emisyjnych i ma decydujący wpływ na strukturę nośników energii pierwotnej (*energy mix*). Krytycznym elementem, wpływającym na dobór rozwiązania jest to, że w niektórych modelach biomasa konkuruje z innymi zasobami odnawialnymi i im większy udział biomasy, tym bardziej ograniczone jest stosowanie pozostałych OZE. Tak więc nakładając ograniczenia na stosowanie biomasy uzyskać można przyspieszenie prac nad doskonaleniem innych technologii, chociaż nieraz za cenę wzrostu kosztów. Przy większym wykorzystaniu biomasy może potencjalnie powstać konflikt w zakresie utrzymania bioróżnorodności, produkcji żywności, dostępności do zasobów wodnych oraz dodatkowych emisji, powstających przy wielkoobszarowej produkcji plonów energetycznych.

Potencjał CCS ma również wpływ na osiągalność celu niskiej stabilizacji i wynikających stąd kosztów. Bez udziału technologii CCS nie jest możliwe uzyskanie niskiego poziomu emisji CO₂, a przy wystarczająco ograniczonym udziale CCS koszty są nadal wysokie. Taką graniczną wartością wydaje się potencjał magazynowania 120 GtC.

Energetyka jądrowa nie odgrywa zasadniczej roli w scenariuszu ograniczenia emisji dla wszystkich modeli w porównaniu ze scenariuszami odniesienia (*baseline*), dla których opcja nuklearna jest rozwiązaniem atrakcyjnym we wszystkich wariantach. Przy wycofaniu energetyki jądrowej obserwuje się wzrost kosztów, lecz wzrost ten jest mniejszy niż dla ograniczonego udziału CCS. Zastosowanie reaktorów powielających znacząco ogranicza wyczerpywanie się zasobów paliwa przy stosunkowo umiarkowanym spadku kosztów ograniczeń emisji, jednakże udział energetyki jądrowej w *energy mix* wzrasta znacząco.

Podsumowanie

Obszerna prezentacja modeli i wyników badań symulacyjnych prowadzi do wniosków następujących. Analizowane modele wskazują ścieżki dojścia do celu niskiego poziomu stabilizacji 400 ppm równoważnika CO₂ przy względnie umiarkowanych kosztach. Przeprowadzone symulacje wykazywały, iż wykonalność techniczna i zasadność ekonomiczna niskiej stabilizacji w sposób zasadniczy zależą od dostępności poszczególnych technologii. Przykładowo, możliwość usunięcia CO₂ z atmosfery zależy od dostępności technologii CCS i wystarczającej dostępności biomasy. Celowe jest opracowanie rozwiązań instytucjonalnych, zapewniających niekonfliktowość produkcji biomasy dla celów energetycznych z produkcją żywności, ochroną środowiska i zasadą rozwoju zrównoważonego. Niezbędne są również dalsze badania wad i skutków ubocznych bioenergetyki i potencjalnych ryzyk technologii CCS; umożliwi to stworzenie bardziej zrównoważonego obszaru ograniczeń, związanych z proponowanymi technologiami.

Aczkolwiek wyniki, uzyskane dla badanych modeli, wskazują na techniczną i ekonomiczną osiągalność celu niskiej stabilizacji, to występują jeszcze dodatkowe uwarunkowania polityczne i instytucjonalne osiągnięcia celu z dużą szansą powodzenia. Dalsze prace mogą zmierzać do stworzenia rynków, certyfikowania produktów oraz mechanizmów,

umożliwiających włączenie certyfikatów emisji z użytkowania biomasy z CCS do międzynarodowego schematu handlu emisjami (ETS). Co więcej – poważne nakłady na prace badawczo-rozwojowe (R&D) nadal będą niezbędne, zanim niektóre z technologii niskowęglowych będzie można uznać za komercyjnie dostępne i szeroko wykorzystywane. Wszystkie rozważane modele zakładają współpracę w skali globalnej w zakresie polityki klimatycznej w najbliższej już przyszłości i transfer technologii pomiędzy poszczególnymi regionami. Osiągnięcie tych celów stanowi olbrzymie wyzwanie dla międzynarodowej polityki klimatycznej. Także wsparcie polityczne jest niezbędne dla osiągnięcia celów niskiej stabilizacji i niezastępowalne przez jedynie analizowane modeli [12].

Literatura

- [1] KLARE B., MEINSHANSEN M., 2006 – How Much Warming are we Committed... *Climatic Change* 75 (1–2).
- [2] www.adamproject.eu
- [3] IPPC: *Climate Change 2008 Fourth Assessment Report (AR4)*. Cambr. Univ. Press.
- [4] FISHER B.S. et al., 2007 – Issues to mitigation in the long-term context. *Climate Change*, Cambn. Univ. Press.
- [5] RAO S. et al., 2008 – IMAGE and MESSAGE Scenarios Limiting GHG Concentration 11 ASA, Laxenburg.
- [6] NORDHAUS W.D., 2009 – The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy. www.nordhaus.econ.yale.edu/dice...
- [7] van VUUREN D.P. et al., 2010 – Comparison of top-down and bottom-up estimates of sectoral and regional GHG emission reduction. *Energy Policy*.
- [8] KYPREOS S., 2005 – Modeling experience curves in MERGE model. *Energy* 30 (14).
- [9] LEIMBACH M. et al., 2010 – Technological Change and international Trade – Insights from REMIND. *The Energy Journal* No 31 (Special Issue 1).
- [10] European Commission: *Poles 2.2*. EC DG XII. EUR 17358, 1996.
- [11] BARKER T., SCRECIEN S.S., FOXON T., 2008 – Achieving the G-8 50% target: modeling induced and accelerated technological change... *Climate Policy* 8.
- [12] EDENHOFER O. et al., 2010 – The Economics of Low Stabilization: Model Comparison of Mitigation Strategies and Costs. *The Energy Journal*. Vol. 31 (Special Issue 1), Jan. 2010.
- [13] NORDHAUS W.D., 2009 – The Permits of the Learning Models for Modeling Endogenous Technological Change NBER Working Paper No. 14638.
- [14] United Nations: *Proceedings of the UN Technical Working Group ...* www.un.org/esa/population.
- [15] KITOUS A. et al., 2010 – Scenarios for the Century with the POLES Model. *The Energy Journal*, Vol. 31 (Special Issue 1), Jan. 2010.
- [16] MAGNÉ B., KYPREOS S., TURTON H., 2010 – Technology options for Low Stabilization Pathways with MERGE. *The Energy Journal*, Vol. 31 (Special Issue 1), Jan 2010.
- [17] BARJER T., SCRIECIU D.S., 2010 – Modeling Low Climate Stabilization with E#MG... *The Energy Journal*, Vol. 31 (Special Issue 1), Jan 2010.
- [18] KNOPF B. et al., 2010 – Managing the Low-Carbon Transition-From Model Results to Policies. *The Energy Journal*, Vol. 31 (Special Issue 1), Jan 2010.

- [19] van VUUREN D.P. et. al., 2007 – Stabilizing greenhouse gas concentration low levels... Climatic Change S1 (2).
- [20] VUUREB D.P. et al., 2010 – Bio-Energy use and Low Stabilization Scenarios. The Energy Journal. Vol. 31 (Special Issue 1), Jan. 2010.

Jacek MALKO

The economics of low stabilization

Abstract

Paper gives a model comparison assessing the technological feasibility and economic viability of achieving a low stabilization target for atmospheric greenhouse gas concentration at moderate cost. All five global energy – environment – economy models show that target to keep the increase in global mean temperature below 2 degrees above pre industrial Celsius levels depends crucially on the availability of particular technologies and additional political and institutional prerequisites. All analyzed models assume global participation in climate policy in the near-term and shift technology transfer across regions.

KEY WORDS: model, energy, economy, environment, low emission, stabilization target

