

Jacek MALKO*

Model „POLES” – ocena transformacji energetyki XXI wieku

STRESZCZENIE. Przedstawiono długoterminową ocenę globalnych scenariuszy rozwoju systemu zaopatrzenia w energię jako studium przypadku z wykorzystaniem modelu „POLES”. Analizie poddano scenariusze od porównawczego do scenariusza bardzo niskiej stabilizacji gazów cieplarnianych. Pomimo naturalnych ograniczeń i niepewności model ten zapewnia wartościowy przegląd możliwych przyszłościowych polityk energetycznych.

SŁOWA KLUCZOWE: sektor energii, model „Poles”, oceny długoterminowe, polityka energetyczna

1. Wprowadzenie

W specjalnym zeszycie *The Energy Journal* (Special Issue 1, 2010), prestiżowego organu *International Association for Energy Economics* (IAEE), zamieszczono przegląd prac z zakresu tzw. „ekonomiki niskiej stabilizacji”, realizującej ambitne cele zapobiegania zmianom klimatycznym na drodze ograniczenia przyrostu temperatury w skali światowej na poziomie +2°C. Wartość ta, wynikająca z analiz Międzyrządowego Panelu ds. Zmian Klimatycznych (IPCC), nie została wprawdzie przyjęta na szczycie klimatycznym w Kopenhadze (grudzień 2009) jako obowiązująca („przyrost temperatury w skali globalnej *nie powinien*

* Prof. dr inż. hab. inż. – Politechnika Wrocławska, Instytut Energoelektryki, Wrocław;
e-mail: Jacek.Malko@pwr.wroc.pl

przekroczyć 2°C” [1]), ale zaostrzenie wymagań w tym zakresie wydaje się nieuchronne. Ocena technicznej wykonalności i ekonomicznej zasadności transformacji energetyki światowej jest domeną modeli 3E (energetyka, ekologia, ekonomika [2, 3]), celowym wydaje się przedstawienie (jako typowego) jednego z tej klasy – modelu POLES [4].

1.1. Sektor energii: tendencje globalne

Połączenie przyrostu ludności świata w horyzoncie do roku 2050 oraz towarzyszącego mu globalnego produktu brutto (PGB) przy braku klarownej polityki energetycznej prowadzi do stałego wzrostu zapotrzebowania na energię. Nawet gdy założyć optymistycznie, iż efektywność użytkowania energii podwoi się w przedziale czasowym półwiecza, to zapotrzebowanie na energię pierwotną ulegnie dwukrotnemu zwiększeniu i nadal wzrastać będzie (aczkolwiek w wolniejszym tempie) do końca stulecia. Rosnący udział energii elektrycznej w strukturze zapotrzebowania na energię końcową sprawia, że tempo wzrostu zużycia tego nośnika dla poszczególnych krajów w przybliżeniu odpowiadać będzie zmianom narodowych produktów brutto (GDP). Wśród sektorowych emitentów CO₂ największą rolę odgrywa sektor energii elektrycznej, a strategia polegająca na niepodejmowaniu znaczących kroków prowadzi do podwojenia emisji sektora energii do roku 2050 oraz dalszego, chociaż bardziej umiarkowanego, przyrostu do roku 2100. Skutkuje to do wzrostem stężenia CO₂ (a szerzej: gazów cieplarnianych) i kojarzonym z tym zjawiskiem przyrostem temperatury globalnej znacząco powyżej rekomendacji Międzynarodowego Panelu d.s. Zmian Klimatu (IPCC, [3]).

1.2. Warunki osiągnięcia celu „2°C”

W obliczu licznych czynników ryzyka i niespójności realizacyjnych w osiągnięciu celu ograniczenia globalnego przyrostu temperatury do 2°C (w porównaniu z wartością dla epoki przedindustrialnej) konieczne jest przyjęcie scenariusza stabilizacji „400 ppm” ekwiwalentnego stężenia CO₂ (uwzględniającego wszystkie emisje gazów cieplarnianych). Wymaga to przyjęcia spójnej i ambitnej polityki, zachęcającej do radykalnych innowacji technologicznych i zmian w zakresie organizacyjnym i behawioralnym zarówno po stronie popytowej jak i podażowej. Ramy instytucjonalne i polityczne muszą zatem zachęcać do rozpowszechnienia takich rozwiązań technicznych jak aktywne energetycznie budynki, pojazdy o bardzo niskiej emisyjności oraz nowe procesy technologiczne i produkty. Przyjęty scenariusz powinien powodować znaczące ograniczenie presji na stosowanie paliw kopalnych (zwłaszcza ropopochodnych) w skali długoterminowej. Wymagać to będzie równoległego rozwijania radykalnie nowych technologii – takich jak wychwytywanie i magazynowanie dwutlenku węgla (CCS) oraz przyspieszenia konwersji na paliwa alternatywne – w rodzaju biopaliw. Może to jednak wywołać nowe napięcia i nawet konflikty, związane z zapewnieniem dostaw energii zwłaszcza w zakresie praw do użytkowania terenów.

1.3. Zastosowanie modelu „POLES”

Relacjonowane w [4] studium zostało wykonane z wykorzystaniem modelu „POLES”. Integrując szczegółowe dane dla regionów, sektorów i technologii rekursywny model symulacyjny umożliwia ocenę polityk ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, zwłaszcza w sektorach energetycznym i przemysłowym w skali globalnej. Uwzględniane są ceny energii w obrocie międzynarodowym jako zmienne endogeniczne, a relacje popytowo-podażowe uwzględniają charakterystyczne przesunięcia czasowe tych procesorów w skali regionów, w tym państw OECD. Szczegółowo uwzględnione są kluczowe 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 opisanych rozwojowych technologii energetycznych, co w dalszej perspektywie czasowej (na przykład roku 2100) może być źródłem istotnych błędów metody.

Model „POLES” należy do grupy pięciu globalnych modeli typu energia – ekologia – ekonomika (3E), będących rezultatem projektu „ADAM” – *ADaptation And Mitigation Strategies* [1], ukierunkowanego na budowanie strategii adaptacji i ograniczeń, wspierających europejską politykę energetyczną [1]. Podstawowym elementem ścieżek, prowadzących do zrównoważonego w perspektywie długoterminowej sektora energii (wraz z analizą czułości) jest ocena roli ograniczeń globalnego zużycia energii na drodze zarówno zwiększenia efektywności, wymuszanej na drodze bodźców fiskalnych, jak i opracowania nowych technologii o niskim zużyciu energii i niskiej emisyjności. Wyzwaniem staje się również rozwój infrastruktury, zapewniającej integrację zasobów rozproszonych z istniejącymi sektorami zaopatrzenia w energię. Rozwój i rozpowszechnienie technologii zasobów rozproszonych (obejmujących wytwarzanie, magazynowanie i użytkowanie – DER) wprowadza złożoną strukturę rozwiązań wielko-, średnio- i małoskalowych, prowadzącą do rozwiązań, zapewniających rozwój zrównoważony. Po stronie popytowej model identyfikuje 47 regionów świata i 22 sektory energetyczne wraz z opisem zmian, wprowadzanych przez politykę klimatyczną. Model ułatwia jednoczesną ocenę opcji popytowych i podażowych przy różnych ograniczeniach, w szczególności obejmujących dostępność zasobów i cele emisyjne. Parametry techniczne charakteryzują produkcję paliw wtórnych (energia elektryczna, wodór ...) oraz cechy energetyczne procesów popytowych (budynki, samochody ...). Ponadto relacje ekonometryczne umożliwiają uwzględnianie wzorców konsumpcyjnych, nie powiązanych z jakąkolwiek opcją technologiczną: krótkoterminowe zmiany behawioralne i długoterminowe opcje inwestycyjne. „W konsekwencji model „POLES” reaguje na każdy rodzaj ograniczeń nie tylko w dziedzinie sposobu zaspokajania potrzeb energetycznych, ale też na drodze zmian w samych potrzebach. W szczególności technologie energooszczędne mają tendencje do zwiększenia penetracji przy wzroście poziomu ograniczeń emisji” [4].

2. XXI stulecie: zapotrzebowanie energii i skutki klimatyczne

Do dalszych analiz wybrano dwa kontrastujące ze sobą scenariusze: scenariusz odniesienia (*baseline*), dla którego ograniczenia emisyjne nie są priorytetem, oraz scenariusz skrajnie niskiego poziomu stabilizacji emisji (*very low stabilization*), dla którego wartość stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze odpowiada 400 ppm równoważnego CO₂ (CO₂ eq.) z sektora energii na poziomach 500 ppm w r. 2050 i 700 ppm w r. 2100 ze stałym dalszym wzrostem. Profil emisyjny dla scenariusza skrajnie niskiej stabilizacji przyjęto jak dla modelu „IMAGE” [3] i oznaczono skrótem „400 ppm”, oznaczającym poziom stężenia CO₂ eq.

Przyszłościowe zapotrzebowanie energii zależne jest od dwóch podstawowych czynników wymuszających (*drivers*) o charakterze społeczno-gospodarczym: wzrostu populacji w skali świata i poziomu osiągniętego dobrobytu, który z kolei warunkuje potrzeby w zakresie wykorzystywania zasobów dla odstawowych funkcji społecznych w rodzaju mieszkalnictwa czy transportu. Podstawowym czynnikiem, napędzającym dynamikę potrzeb energetycznych, jest ewolucja wzorców konsumpcji, która uzależniona jest od sposobu traktowania problemów ochrony środowiska.

Modele typu „3E” (w tym model „POLES”) przywiązują wagę priorytetu do problemu zmian klimatycznych, chociaż w kształtowaniu wzorców rozwoju ekonomicznego istotną rolę odgrywać mogą również inne, związane ze środowiskiem, problemy jak dostęp do zasobów wody, zarządzanie bioróżnorodnością czy erozja gleby. Nie są one jednak rozważane w opisanym modelu „POLES”, a jedynie sygnalizowane jako potencjalne graniczenia dokonanych analiz.

2.1. Kluczowe społeczno-ekonomiczne czynniki sprawcze zapotrzebowania energii

Model „POLES” uwzględnia dwa podstawowe egzogeniczne czynniki, warunkujące zapotrzebowanie energii: potencjał demograficzny i przyrost PKB na mieszkańca (tab. 1 i 2). Przewiduje się wzrost populacji świata do roku 2050, z dalszą tendencją do stabilizacji. Po roku 2030 wiele regionów wykaze spadek zaludnienia (depopulacja) – są to Europa, b. ZSRR (WNP), Chiny i strefa Pacyfiku, do których dołączą po roku 2050 Ameryka Łacińska i Indie. Przyrost ludności nastąpi w Afryce i na Środkowym Wschodzie; stabilizacji oczekuje się dla Ameryki Płn. i pozostałych krajów Azji.

Rozwój gospodarczy (mierzony przyrostem PKB/ca) nastąpi we wszystkich regionach, z tendencją szybszego wzrostu dla regionów biedniejszych, co prowadzi do zmniejszenia rozwarstwienia poziomów życia. Najuboższym regionem pozostanie Afryka, zaś pewne regiony (jak Chiny i Środkowy Wschód) zbliżą się do obecnego poziomu krajów uprzemysłowionych.

TABELA 1. Prognozy demograficzne dla świata i regionów

TABLE 1. World and regional population assumption

Mld	2000	2020	2050	2100	2000–2020	2020–2050	2050–2100
Świat	6,08	7,57	9,07	9,20	1,1%	0,6%	0,0%
Ameryka Płn.	0,31	0,37	0,44	0,46	0,9%	0,5%	0,1%
Ameryka Łac.	0,52	0,67	0,78	0,75	1,2%	0,5%	-0,1%
EU27	0,48	0,49	0,47	0,41	0,1%	-0,2%	-0,3%
b. ZSRR	0,28	0,27	0,24	0,20	-0,2%	-0,4%	-0,4%
Strefa Pacyfiku	0,16	0,17	0,16	0,14	0,2%	-0,1%	-0,3%
Chiny	1,27	1,42	1,39	1,18	0,6%	-0,1%	-0,3%
Indie	1,02	1,33	1,59	1,52	1,3%	0,6%	-0,1%
Pozost. Azja	0,93	1,23	1,55	1,60	1,4%	0,8%	0,1%
Afryka	0,81	1,23	1,94	2,41	2,1%	1,5%	0,4%
Środkowy Wschód	0,17	0,26	0,37	0,42	2,0%	1,2%	0,3%

Źródło: ONZ (2004), Scenariusz „MEDIAN”

TABELA 2. Prognozy przyrostu PKB/ca

TABLE 2. GDP per capita growth (USD 2000)

Mld	2000–2030	2030–2050	2050–2100
Świat	2,2%	2,0%	1,7%
Ameryka Płn.	1,6%	1,1%	1,1%
Ameryka Łac.	1,9%	2,3%	2,2%
EU27	2,3%	1,8%	1,1%
b. ZSRR	6,0%	3,2%	1,5%
Strefa Pacyfiku	2,0%	1,8%	0,9%
Chiny	8,6%	4,6%	1,8%
Indie	6,1%	4,2%	3,0%
Pozost. Azja	3,9%	3,0%	2,7%
Afryka	1,7%	1,8%	3,3%
Środkowy Wschód	1,8%	2,1%	3,5%

Źródło: Projekt „ADAM”

Obydwa scenariusze emisyjne zakładają takie same oszacowania dynamiki PKB, co może jednak prowadzić do problemów ze spójnością modelu na skutek wielorakości i złożoności sprzężeń ekonomicznych. Obejmują one zmiany dynamiki w makroekonomii, ekonomiczne skutki innowacyjności w zakresie technologii i organizacji, geopolityczne skutki procesów wyczerpywania się zasobów oraz konsekwencje klęsk środowiskowych. Jednakże przyjęcie identycznych założeń dla obydwu scenariuszy umożliwia skupienie się na problemach przekształceń w sektorze energii przy ilościowej ocenie alternatywy w kategoriach zapotrzebowania na energię i struktury paliwowej (*fuel mix*) dla trajektorii wzrostu.

W każdym razie w perspektywie długoterminowej dochować należy staranności w rozpatrywaniu wzrostu PKB: jak czynnik ten ma się do wzrostu ilościowego wytwarzanych i konsumowanych dóbr i usług oraz jaki jest związek z wartością dodaną, odczuwaną przez konsumentów i wynikającą ze zmianą samej natury tych dóbr i usług. Z punktu widzenia potrzeb energetycznych zmiany ilościowe są decydujące, podczas gdy zmiany jakościowe mają skutki dość ograniczone.

W rozważanym przypadku dwóch scenariuszy zasadnicze potrzeby społeczne: „dach nad głową” i potrzeba mobilności są dla obydwu przypadków takie same, mimo iż technologie i środki ich osiągnięcia są skrajnie odmienne.

2.2. Zapotrzebowanie energii

Dynamika potrzeb energetycznych zależy od wielu kluczowych parametrów, na przykład aktywności społeczeństw, zasobów i polityki ograniczenia emisji CO₂. Ten ostatni czynnik silnie oddziałuje na ceny energii i procesy konkurencyjne w technologiach. Czynniki takie jak wskaźniki aktywności (demografia, PKB) oraz dostępność zasobów są dla obydwu scenariuszy jednakowe, zatem czynnikami różnicującymi pozostają polityki klimatyczne oraz ich skutki dla wykorzystania zasobów.

Zapotrzebowanie energii końcowej

W scenariuszu odniesienia (*baseline*) przewidywane zapotrzebowanie na energię w końcu stulecia (2000–2100) zwiększy się przeszło dwukrotnie (300 EJ/rok do 700 EJ/rok), zaś wartość energii na mieszkańca – z 1,6 GJ/ca do 1,8 GJ/ca. Następować będzie stały wzrost udziału energii elektrycznej w strukturze nośników – od 7% w roku 2007, 32% w roku 2050 oraz do przeszło 50% pod koniec stulecia, co odpowiada rocznym przyrostom 3,2% w latach 2000–2020, 2,4% dla okresu 2020–2051, 4% po roku 2050. Wzrost ten odpowiada w przybliżeniu przyrostowi PKB (średnia całego okresu). Oczekiwać można znaczącego udziału wodoru po roku 2050 z wykorzystaniem głównie w sektorze transportu. Tendencja zwiększania udziału paliw wtórnych (uszlachetnionych) może być interpretowana w kategoriach preferencji dla „paliw łatwych w użytkowaniu” oraz jako skutek rozpowszechnienia technologii, wykorzystujących zasoby odnawialne. Dla scenariusza „400 ppm” całkowite zapotrzebowanie na energię końcową jest znacząco niższe dla *baseline* i do roku 2100

utrzymuje się na poziomie jak dla roku 2020. Zużycie energii elektrycznej jest nieco niższe niż dla scenariusza odniesienia, ale jej udział w rynku znacznie wzrasta, osiągając 43% dla roku 2050 i blisko 67% w roku 2100. Emisje rozproszone (na poziomie konsumenta) są całkowicie zlikwidowane i przeniesione na poziom scentralizowanych wytwórców energii elektrycznej i wodoru.

Zarówno w scenariuszu *baseline* jak i „400 ppm” paliwa kopalne są wykorzystywane w coraz większym stopniu w sektorach przetwarzania na nośniki wtórne, co wynika zarówno z ograniczeń emisyjnych dla GHG jak i coraz trudniejszej dostępności zasobów, łatwych w eksploatacji przy wykorzystaniu mniej zaawansowanych technologii.

Penetracja kluczowych technologii zastosowań energii

Przypadek 1: samochody. W tabeli 3 przedstawiono zmiany udziału podstawowych technologii napędu lekkich pojazdów samochodowych, penetrujących rynek po roku 2015. Regres dotyczy zasadniczo konwencjonalnego napędu, wykorzystującego silniki wewnętrznego spalania, zasilane paliwami ropopochodnymi. W obydwu scenariuszach tendencje te wynikają głównie z postępu w zakresie alternatywnych źródeł napędu, aczkolwiek działania te są intensyfikowane przez wzrost cen paliw ropopochodnych. Postęp jest bardziej znaczący dla scenariusza „400 ppm”, dla którego udział nowych technologii sięga około 70% dla całej floty pojazdów lekkich w roku 2050, podczas gdy dla *baseline* udział ten wynosi 56%. Pod koniec stulecia (dla obydwu scenariuszy) większość samochodów będzie uzależniona od sieci elektroenergetycznej. Złożona dynamika procesów uczenia nowych technologii oraz ewolucja cen ropy naftowej i pozwoleń na emisję CO₂ wpływa na zróżni-

TABELA 3. Udział przebiegów (wozokilometry) dla konkurencyjnych technologii

TABLE 3. Distribution of vehicle-km among competing technologies

	2000		2050		2100	
	Baseline	400 ppm	Baseline	400 ppm	Baseline	400 ppm
Udział w sektorze pojazdów lekkich						
Konwencjonalne	100%	100%	44%	29%	10%	4%
Hybrydowe	0%	0%	28%	33%	34%	30%
Elektryczne	0%	0%	18%	26%	26%	29%
Wodorowe spalania wewn.	0%	0%	11%	12%	17%	27%
Wodorowe ogniwa paliwowe	0%	0%	0%	0%	9%	8%
Gazowe ogniwa paliwowe	0%	0%	0%	0%	4%	1%
Zużycie energii	906	906	1 650	928	1 698	718

Źródło: Model POLES [4]

cowanie udziału pojazdów elektrycznych i napędzanych wodorem. Przyjętymi założeniami przy sporządzaniu tych ocen jest przyjęcie, iż w skali światowej nie nastąpi pełna dominacja żadnej z rozważanych technologii („zwycięzca bierze wszystko”); że następuje koegzystencja różnych typów pojazdów. Na tym polega właściwość modelu „POLES”, który nie dążąc do „czystej” optymalizacji zmierza do zaprojektowania systemu zróżnicowanego i elastycznego, w którym dostępne są różne opcje techniczne. Podstawowa różnica pomiędzy scenariuszami w perspektywie długoterminowej polega na zmianach struktury użytkowanych paliw w kategoriach wykonanej pracy transportowej. Scenariusz „400 ppm” zakłada przejście na modele mniejsze, lżejsze i oszczędniejsze w zużyciu paliwa od współczesnych.

Przypadek 2: budynki niekonwencjonalne. W modelu „POLES” rozważa się trzy kategorie technologii, różniące się parametrami energetycznymi. Są to (1) Budynki standardowe, dla których właściwości termiczne wynikają z długoterminowej elastyczności cenowej i tendencji historycznych (zużycie energii obniża się średnio o 0,4%/rok, m². (2) Budynki „niskoenergetyczne” o parametrach energetycznych dwukrotnie lepszych niż dla budynków „standard”. (3) Budynki niskoenergetyczne o parametrach czterokrotnie lepszych od standardowych w zakresie zużycia energii na metr kwadratowy. Technologie alternatywne powodują dodatkowe koszty inwestycyjne, które podważają efektywność kosztową w całym stuleciu dla scenariusza *baseline* mimo rosnących cen paliw węglowodorowych. Sytuacja zmienia się dramatycznie dla scenariusza „400 ppm”, w którym wprowadzenie opłat za emisje węglowe powoduje znaczne podwyższenie cen energii. Budynki nisko- i skrajnie niskoenergetyczne zwiększają stopniowo swój udział w rynku na drodze nowego budownictwa i termomodernizacji zasobów istniejących; dla scenariusza „400 ppm” te nowe technologie uczestniczą niemal w 50% w zasobach budynków w roku 2050, zaś pod koniec stulecia obejmują większość zasobów istniejących i całość nowego budownictwa.

Zapotrzebowanie na energię pierwotną

Wartość energii pierwotnej wynika z zapotrzebowania na energię końcową (finalną) i ze struktury systemu, zbudowanego dla pokrycia potrzeb energetycznych. W scenariuszu odniesienia założono względnie szeroką dostępność nośników dogodnych transakcyjnie i magazynowalnych, takich jak węgiel i gaz (przynajmniej do połowy stulecia). Z uwagi na istnienie dogodnych szlaków transportowych scenariusz *baseline* reprezentuje świat usieciowiony globalnie, coraz bardziej uzależniony wzajemnie w regionach.

Wariant „400 ppm” odpowiada sytuacji wielkiego nacisku na ograniczenie roli paliw kopalnych, w wykorzystywaniu których nie występuje przechwytywanie i magazynowanie CO₂ (technologie CCS). Scenariusz ten daje priorytet zasobom odwęglonym, często znacznie trudniejszym w wykorzystywaniu niż paliwa kopalne, co wynika z problemów transportu i magazynowania. Występuje to dla źródeł solarnych i wiatrowych, a nawet w pewnym stopniu dla energetyki jądrowej. Co więcej, zasoby odnawialne są rozproszone i ich dostępność jest limitowana względami fizykalnymi i akceptacją społeczną. W wyniku tego system energetyczny ewoluuje przy nowym zbiorze ograniczeń, uwzględniających

efektywność i konsekwencje w zakresie urbanizacji i możliwości przemieszczania się. Taki dekarbonizujący się świat można traktować za odpowiadający modelowi zlokalizowanemu w zakresie wzorca korzystania z energii i będącemu przeciwieństwem świata usieciowanego, odpowiadającego uwarunkowaniem scenariusza *baseline*. Dla modelu „POLES” priorytetami jest efektywność energetyczna oraz technologie o niskim zużyciu energii końcowej, przyjęte za najbardziej skuteczne w warunkach drastycznych ograniczeń emisyjnych. Ten obraz może zmienić jedynie zbudowanie i wykorzystanie sieci o wysokich zdolnościach przesyłowych, zdolnych do transportowania energii z wykorzystywanych na masową skalę źródeł odnawialnych (na przykład energia źródeł solarnych z okolic pustynnych, przesyłana do ośrodków zapotrzebowania). Średnie zużycie energii pierwotnej *per capita* podwaja się dla scenariusza odniesienia do końca stulecia, osiągając 3,5 GJ, zaś intensywność energetyczna zmniejsza się niemal czterokrotnie. Scenariusz „400 ppm” stabilizuje zużycie energii pierwotnej na mieszkańca na poziomie około 1,5 GJ/rok, przy ośmiokrotnym zmniejszeniu intensywności wykorzystania energii. Zapotrzebowanie na energię pierwotną na mieszkańca w obydwu scenariuszach wzrasta w przybliżeniu tak samo jak dla energii końcowej; nieco wolniejszy wzrost dla *baseline* wynika z rosnącej roli paliw uszlachetnionych i wskaźnika efektywności transformacji.

W scenariuszu porównawczym dominującym źródłem energii pierwotnej pozostaje węgiel, podczas gdy ropa naftowa zmniejsza nieco swój udział w strukturze nośników po roku 2030, a wzrasta rola zasobów niekopalnych. Dla scenariusza „400 ppm” paliwa kopalne do roku 2050 redukują swój udział do 50% energii pierwotnej i do końca stulecia ulegają marginalizacji. Będą one częściowo zastępowane przez biomasę, ale równie istotnym czynnikiem staje się znaczna poprawa użytkowania energii po stronie popytowej. Poziom zapotrzebowania na inne OZE oraz energetyka jądrowa jest dla scenariusza „400 ppm” tylko nieznacznie wyższy niż dla *baseline*, ale udział tych źródeł w całkowitym zapotrzebowaniu na energię pierwotną jest znacznie wyższy na skutek obniżonego zapotrzebowania końcowego.

2.3. Skutki emisyjne dla CO₂

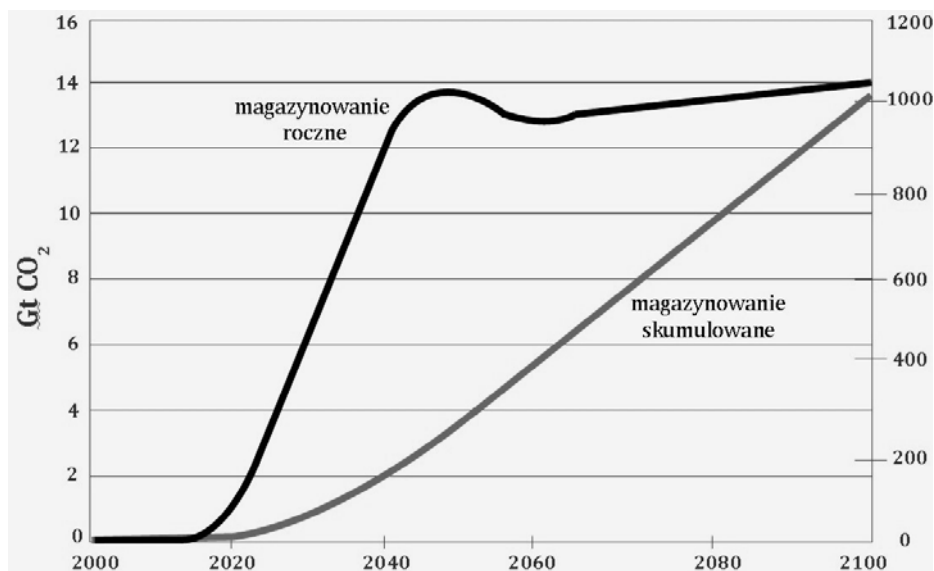
Model „POLES” ocenia emisje CO₂ w sektorze energetycznym, opierając się na danych z modelu „IMAGE” [3] dla emisji całości gazów cieplarnianych z energetyki i przemysłu. Duży przyrost emisji dla scenariusza *baseline* (od 24 Gt CO₂ w roku 2000, przez 50 Gt w roku 2050 do niemal 70 Gt w roku 2100) jest powodowany głównie przez sektor energii, wykorzystujący zwiększone ilości węgla, co jest opcją najtańszą przy braku skutecznej polityki klimatycznej. Emisje tylko z elektroenergetyki pod koniec stulecia będą dwukrotnie wyższe niż obecna emisja całkowita. Kontrastuje to z wizją „400 ppm”, skutkującą „negatywną” emisją CO₂ w przyszłości i całkowitym „odwęglaniem” sektora energii elektrycznej. Uzyskana struktura źródeł wynika z założonego celu: utrzymania stężenia GHG na poziomie dostatecznie niskim, by uzyskać wysokie prawdopodobieństwo utrzymania stałego przyrostu globalnej temperatury poniżej +2°C. W tym scenariuszu znikają niemal wszystkie źródła emisji bezpośredniej (przy marginalnym udziale transportu lądowego i lotniczego),

podczas gdy technologie przetwarzania energii (na energię elektryczną i wodór) dają globalnie emisyjny ujemny efekt. Te negatywne emisje w istocie wynikają z faktu, że emisja CO₂ z biomasy pochodzenia roślinnego (traktowanej jako emisyjnie neutralna) zostanie wychwycona i przechowywana w podziemnych strukturach geologicznych, działając jako swoista pompa CO₂ z atmosfery.

Dla osiągnięcia bardzo niskiej emisji i uczestniczenia w redukcji tych emisji niezbędne są w scenariuszu „400 ppm” zróżnicowane opcje technologiczne. Niemal 50% skumulowanej redukcji uzyskuje się bezpośrednio w sektorach użytkowania końcowego: 36% poprzez wzrost efektywności i 10% przez konwersję na paliwa niskowęglowe po stronie popytu.

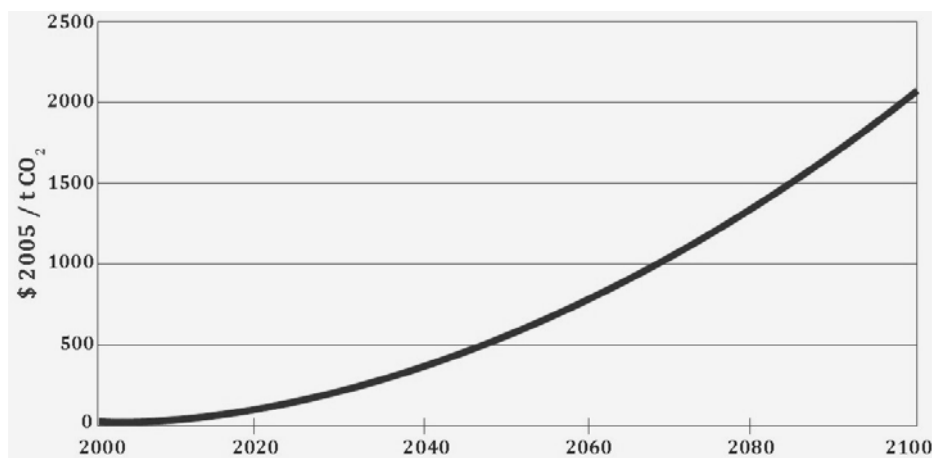
Po stronie podażowej kluczowym czynnikiem (uczestniczącym w 25% w skumulowanej redukcji emisji) jest sekwestracja CO₂, podczas gdy wszystkie technologie OZE dają efekt zbliżony; źródła jądrowe dają efekt 4%. Konwersja od węgla do gazu ziemnego zachodzi jedynie na początku okresu i do roku 2100 jej wpływ jest do pominięcia. Rozważane dwa scenariusze dają do końca stulecia różnicę w skumulowanej emisji, wynoszącą 3900 Gt CO₂.

Na rysunku 1 przedstawiono ewolucję rocznych i skumulowanych wartości CO₂ przechwyconych w sektorze energii elektrycznej i w przemyśle. Po szybkim wzroście do roku 2050 przechwytywane ilości ulegają zmniejszeniu do poziomu około 14 Gt CO₂ rocznie. Model uwzględnia straty w procesie eliminacji CO₂, oceniając je na minimalnym poziomie 5% dla elektrowni i 25% dla przemysłu. Ogranicza to możliwości rozwoju technologii węglowych (+CCS) w krajach o znaczącym udziale tego paliwa (Chiny, USA) około roku 2050, gdy cena emisji węgla staje się względnie wysoka (rys. 2). Stwierdzić należy, iż brak jest dziś dostatecznie wiarygodnych informacji o najlepszych technologiach i bezpieczeń-



Rys. 1. Przechwycone i zmagazynowane (roczne i skumulowane) emisje CO₂

Fig. 1. Captured and stored (yearly and cumulated) CO₂ emissions



Rys. 2. Ewolucja cen pozwoleń na emisję CO₂

Fig. 2. Evolution of CO₂ emissions prices

stwie składowania, zapewnianych przez CCS, ale poziom cen „zezwoleń na emisję” po roku 2050 oznacza w istocie całkowity zakaz emisji CO₂.

Jednakże przewidywania w horyzoncie, przekraczającym połowę stulecia, traktować należy z dużą ostrożnością z uwagi na czynnik niepewności i trudności w opisie systemu społeczno-gospodarczego w perspektywie długoterminowej. Tak więc poziom cen za emisję ma odwzorować niedeterminizm modelowania przyszłości.

Koszt wprowadzenia ograniczeń emisyjnych w rozważanych sektorach na poziomie gospodarki światowej i prowadzących do scenariusza „400 ppm” wzrasta systematycznie do 2,5% połączonych produktów krajowych (PKB) w skali świata w roku 2050. Po tej dacie malejący zakres emisji podlegających redukcji powoduje nieznaczne obniżenie kosztów do końca stulecia.

3. Analiza czułości

Dla oceny roli opcji technologicznych w strukturze emisji CO₂ oraz kosztów realizacji polityki niskowęglowej dokonano analizy wrażliwości dla czterech czynników (*sensitivity analysis*). Są to:

- ✧ rola potencjału biomasy,
- ✧ rola CCS,
- ✧ rozwój energetyki jądrowej,
- ✧ efektywność energetyczna.

Dla każdego z przypadków rozważono scenariusze „bez ograniczeń” oraz „z ograniczeniami”:

- ✧ dla potencjału biomasy modelowano przypadek wysokiego potencjału 400 EJ (*biomax*) oraz niskiego potencjału 100 EJ (*biomin*);
- ✧ dla CCS rozważono przypadek pominięcia tej technologii (*noccs*);
- ✧ dla energetyki jądrowej rozważany jest przypadek zaniechania inwestycji łącznie z modernizacją (*nukefadeout*);
- ✧ dla efektywności: przypadek zmniejszenia długoterminowej elastyczności cenowej w sektorach zapotrzebowania końcowego o połowę (*lowelas*).

Poziomy emisji bez wprowadzenia jakichkolwiek ograniczeń węglowych kształtują się odmiennie dla rozważanych scenariuszy. Wynika z tego, iż poziomy ograniczeń, niezbędnych dla tej samej wartości redukcji, będą się różnić: i tak dla stężenia „400 ppm” będą one podobne, dla scenariuszy *noccs* i *biomax*, nieco wyższe dla *biomin* oraz znacząco wyższe dla *lowelas* i *nukefadeout*. Ten ostatni przypadek jest szczególnie interesujący, bowiem wykazuje, udział technologii jądrowych w ograniczeniu emisji CO₂ bez wprowadzenia opłat węglowych (elektrownie jądrowe są głównie zastępowane przez węglowe w wariantach bez ograniczeń). Dwa scenariusze *lowelas* i *nukefadeout* wymagają skumulowanej redukcji, różniącej się dla przypadków „bez ograniczeń” i „z ograniczeniami” do roku 2100 odpowiednio o 4200 Gt CO₂ i 4300 Gt w porównaniu z 3900 Gt w scenariuszu „400 ppm”.

Bez ograniczeń emisji dla dwóch przypadków *biomin* i *noccs* nie będzie osiągnięty poziom „400 ppm”, gdyż nie nastąpi odpowiednia kumulacja ograniczeń emisji ze spalania biomasy. Dla przypadku *noccs* emisje wzrastają znacząco powyżej długoterminowego celu (obecnie pomiędzy „400 i 450 ppm” CO₂). Dla pozostałych trzech przypadków cel ten (sprecyzowany w CO_{2eq}) projekcie „ADAM” [2] jest do osiągnięcia, lecz przy różnych kosztach krańcowych i kosztach wprowadzania ograniczeń w sektorze energii. Scenariusz *biomax* cechują koszty ograniczeń niższe o 40% niż dla celu „400 ppm” przy 1,5 PGB (i znacznie niższe ceny wartości emisji węgla); scenariusz *nukefadeout* generuje koszty o 30% wyższe (3,3% PGB), zaś scenariusz *lowelas* (o dwukrotnie niższej elastyczności długookresowej) daje koszty o 60% wyższe (4% PGB). Można jeszcze zauważyć, iż dla przypadku *biomin* (nawet mimo, iż nie jest osiągnięty cel „400 ppm”) koszty są wysokie – ponad 3,5% PGB.

Koszty zezwoleń na emisję węglową, niezbędne dla osiągnięcia założonego stężenia CO₂, różnią się znacząco w zależności od przyjętych założeń i w porównaniu ze scenariuszem „400 ppm” od wartości trzykrotnie niższej (*biomax*) do dwukrotnie wyższej (*noccs*, *biomin* i *lowelas*). Ogólne wnioski z przeprowadzonej analizy czułości są następujące:

- ✧ większy udział biomasy (*biomax*) – prowadzi do zwiększenia udziału technologii CCS i OZE w wytwarzaniu energii elektrycznej oraz większej konwersji w kierunku biomasy i energii elektrycznej w zapotrzebowaniu na energię końcową;
- ✧ mniejszy udział biomasy (*biomin*) prowadzi do skutków odwrotnych;
- ✧ brak technologii CCS (*noccs*) prowadzi do konieczności znacząco wyższego udziału biomasy i zwiększenia efektywności;
- ✧ rezygnacja z energetyki jądrowej wymaga zwiększenia udziału zasobów odnawialnych (OZE) – głównie solarnych i wiatrowych (bowiem biomasa osiąga maksimum swych możliwości) oraz niewielkiego zwiększenia udziału technologii CCS;

- ✧ przypadek niskiej długoterminowej elastyczności cenowej (*lowelas*) prowadzi do skutków zbliżonych do przypadku „400 ppm” (choć z większym udziałem źródeł jądrowych), lecz przy znacznie wyższych kosztach 4% PGBvs. 2,5% dla „400 ppm” w roku 2100).

4. Ograniczenia i niepewności

Predykcje długoterminowe – a sektor energii nie stanowi tu wyjątku – skłaniają do ostrożności w przyjmowaniu ilościowych wyników rozważanych modeli. Oczekiwać można, iż w najbliższych dziesięcioleciach pojawią się całkowicie innowacyjne rozwiązania w zakresie technologii i organizacji, zmieniające drastycznie scenę energetyczną w perspektywie 50–100 lat. Celowe jest zatem podjęcie próby identyfikacji podstawowych kategorii ograniczeń i niepewności.

Pierwszą z nich – i prawdopodobnie najważniejszą – jest odnosząca się do zmian w fizycznym otoczeniu, zachodzących w trakcie stulecia oraz w konsekwencji wpływających na działalność człowieka. Zmiany te pochodzą zarówno od narastającego wyczerpywania się zasobów oraz od zmian klimatycznych. W dziedzinie zasobów oczekiwać można różnych form konfliktów w konkurowaniu o kontrolę nad nimi (surowce mineralne, woda, teren, energia). Przyjmowany poziom energetycznego wykorzystywania biomasy jest przedmiotem troski z uwagi na konkurencyjne sposoby użytkowania terenu oraz stabilność naturalnych cykli w przyrodzie. Co więcej – dostępność zasobów może być znacząco modyfikowana przez skutki zmian klimatu, przejawiające się przez migracje ludności i zmienne wzorce osadnictwa. Z powodu takich zmian rozwój ekonomiczny, dynamika demograficzna i lokalizacje mogą różnić się znacząco od przyjętych w przytoczonych analizach [2]. Z tych też względów zakładany scenariusz odniesienia (*baseline*) może nie mieć cech samoroznoważenia.

Druga z kategorii ograniczeń i niepewności dotyczy technicznego wymiaru przyszłości. Zestaw technologii jest w istocie ograniczony do tych, które są obecnie znane, już wcześniej wprowadzone lub będące w stadium zaawansowanego dokumentowania. Jednakże postęp naukowo-techniczny może prowadzić do zmian dramatycznych w zakresie zarówno technologii podaźowych, jak i popytowych. W cytowanym raporcie [2] wiele technologii nie jest uwzględnionych, głównie z powodu braku dostatecznych informacji o ich technicznych i ekonomicznych właściwościach, ale mogą one być zastosowane i odegrać znaczącą rolę do końca stulecia. Po stronie podaźowej można tu wymienić fuzję jądrową, wielkie źródła energii, wykorzystującej pływy oceaniczne, magazynowanie energii na wielką skalę oraz nowe zastosowania biotechnologii. Po stronie popytowej jesteśmy nadal daleko od zrozumienia wszystkich aspektów bio- i nanotechnologii, technologii informatycznych i komunikacyjnych (ICT) oraz ich wpływu na organizację sektora zaopatrzenia w energię

Trzecia kategoria jest związana z ewolucją stylu życia oraz instytucjonalnych form organizowania społeczeństw w szybko zmieniającym się otoczeniu. Głęboka transformacja

strukturalna społeczeństw i wzorców rozwojowych wystąpi prawdopodobnie na przykład w zakresie urbanizacji i transportu. Może to realizować się bądź jako reakcja na zmiany klimatyczne lub z licznych innych powodów endogenicznych. Co więcej, styl życia może nadążać adaptacyjnie za nowymi formami pozyskiwania energii, akceptując znaczny, a niezbędny rozwój systemów, opartych na odnawialnych źródłach energii pierwotnej (energia solarna, wiatrowa, oceaniczna).

Wszystkie te niepewności i ograniczenia prowadzą do konieczności określenia stopnia, w jakim niezbędna jest zmiana paradygmatu w sposobach produkowania, przesyłania, rozdziału i użytkowania energii.

Pomimo sprecyzowanych wyżej problemów, wynikających z niepewności i ograniczeń, przeprowadzona w [2] analiza rzuciła nowe światło na przyszłe polityki energetyczne. Wykazano, iż w przypadku braku polityki klimatycznej globalny system zaopatrzenia w energię będzie narażony na ryzyko, pochodzące od narastającego wyczerpywania się konwencjonalnych zasobów węglowodorowych. Sytuacja ta może przejawiać się w utrzymujących się napięciach na rynkach, w szokach cenowych i kryzysach geopolitycznych. W dalszej perspektywie oczekiwać można ograniczonej dostępności węgla i rudy uranu, co również skutkuje problemami już po roku 2050. Ponadto poziom emisji CO₂ w scenariuszu odniesienia daleko przekracza zalecenia Międzyrządowego Panelu ds. Zmian Klimatycznych (IPCC), prowadząc do poważnych napięć w obszarze społecznym, gospodarczym i w ekosystemach naturalnych.

Uprawnione staje się wnioskowanie, iż istnieje dwójaka korzyść z formułowania polityki zmian klimatycznych: poza ograniczeniem potencjalnie niekorzystnych efektów głębokich zmian klimatu rozwój systemów opartych na kopalnych zasobach energii staje się w dalszej perspektywie czasowej bardziej zrównoważony oraz zmniejsza napięcia na międzynarodowych rynkach energii w horyzontach krótko- i średnioterminowych. Te właśnie czynniki zmuszają do pełnego rozpoznawania zróżnicowanych kategorii kosztów, związanych ze scenariuszami zarówno bez polityki klimatycznej, jak wprowadzających warianty dostosowawcze.

Kluczowym elementem ścieżki zrównoważonej strategii energetycznej w symulacjach z wykorzystaniem modelu „POLES” wydaje się rola ograniczeń globalnego zużycia energii, wprowadzanych zarówno na drodze zwiększenia efektywności energetycznej we wszystkich sektorach poprzez system cenotwórstwa i taryfikacji, jak i przez wprowadzenie nowej generacji technologii użytkowania końcowego o bardzo małym jednostkowym zużyciu energii i niskiej emisyjności; zwłaszcza w transporcie i budownictwie. Jednakże opcje niskiej emisji gazów cieplarnianych (wielkoskalowe wykorzystanie OZE, technologie jądrowe, CCS, magazynowanie energii ...) wymagają intensywnego rozwoju dla scenariuszy bardzo niskiej stabilizacji, przy czym opcje te wykazują znaczną wrażliwość na wartość zasobów biomasy. Rodzi to problem rozwoju infrastruktury, niezbędnej dla wielkoobszarowego i efektywnego pozyskiwania zbiorów i ich transportu na znaczne odległości. Szybki rozwój zasobów odnawialnych w dalszej perspektywie zależeć będzie od złożonych rozwiązań lokalnych lub rozproszonych oraz od zbudowania infrastruktur produkcyjno-transportowych wielkiej skali. Zbadanie tych radykalnie nowych systemów technologicznych jest podstawowym zadaniem dla rozwoju dróg zrównoważonego systemu energii tego stulecia.

Post Scriptum

Nowy impuls zagadnienia dążenia do gospodarki niskoemisyjnej nadany został przez opublikowanie 8 marca br. ważnego dokumentu – komunikatu KE *A roadmap for moving to a low carbon economy in 2050* (COM (2011)112). W tej sprawie rząd RP sformułował dokument „Stanowisko Rządu”, zgłaszając liczne uwagi i zastrzeżenia, w tym odnoszące się do stosowanych modeli ekonomicznych. „Rząd Rzeczypospolitej Polskiej rekomenduje umieszczenie w internecie danych i modeli, używanych przez KE do symulacji, w tym w szczególności modeli PRIMES i POLES”.

Literatura

- [1] www.ipcc.ch: The latest scientific news on climate change
- [2] EDENHOFER O., et al., 2010 – ADAM’S Modeling Comparison Project – Intentions and Prospects. *The Energy Journal*, Vol. 31, Spec. Is 1.
- [3] EDENHOFER O., et al.2010 – The Economics of Low Stabilization – Model Comparison of Mitigation Strategies and Costs. *The Energy Journal*, Vol. 31, Spec. Iss. 1.
- [4] KITONS A., et al., 2010 Transformation Patterns of the Worldwide Energy System – Scenarios for the century with the “POLES” Model. *The Energy Journal*, Vol. 31, Spec. Iss. 1.

Jacek MALKO

The „POLES” model: assessment of energy. Path of 21st century

Abstract

A long-term assessment of the scenarios worldwide energy system development as the case study on the basis “POLES” Model is presented. Scenarios ranging from a baseline to a very low greenhouse gas stabilization are analysed. Despite the natural limitations and uncertainties model provides valuable insights on future energy policies.

KEY WORDS: energy sector, POLES model, long-term assumption, energy policy