



Radosław SZCZERBOWSKI\*

## Modelowanie systemów energetycznych – charakterystyka wybranych modeli

**STRESZCZENIE.** Szereg zmian zachodzących w sektorze energetyki uzależnionych jest od wielu czynników nie tylko technicznych i ekonomicznych, ale także społecznych i politycznych. Polski sektor energetyczny stoi obecnie przed poważnymi wyzwaniami. Wysokie zapotrzebowanie na energię finalną, nieadekwatny poziom infrastruktury wytwórczej i przesyłowej, uzależnienie od zewnętrznych dostaw gazu ziemnego i ropy naftowej oraz zobowiązania w zakresie ochrony klimatu powodują konieczność podjęcia zdecydowanych działań. W celu realizacji zadań prawidłowego funkcjonowania systemu energetycznego niezbędnym elementem jest proces ciągłej obserwacji i przewidywania zmian stanu systemu w różnych horyzontach czasowych. Złożoność problemów gospodarki paliwami i energią powoduje, że modele komputerowe są obecnie podstawowym narzędziem dla ich analiz. Decyzje dotyczące polityki energetycznej i ekologicznej wymagają wcześniejszych badań skutków, które można oszacować za pomocą wielu modeli.

**SŁOWA KLUCZOWE:** bezpieczeństwo energetyczne, mix energetyczny, polityka energetyczna, modelowanie systemów energetycznych.

### Wprowadzenie

Obecny stan bezpieczeństwa energetycznego w poszczególnych sektorach polskiej energetyki jest mocno zróżnicowany. Dlatego też od kilku lat temat związany z przyszłością

---

Dr inż. – Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Poznań;  
e-mail: radoslaw.szczerbowski@put.poznan.pl

energetyki stanowi jeden z najważniejszych problemów w polityce krajowej. W elektroenergetyce oraz ciepłownictwie, które oparte są na własnych zasobach węgla kamiennego i brunatnego, Polska jest samowystarczalna. W sektorze gazu oraz paliw płynnych, w znacznej mierze uzależniona jest od importu, głównie z Rosji. Polska posiada spore zasoby energii odnawialnych, lecz ich wykorzystanie jest jak dotąd niewielkie. Na podstawie tworzonych bilansów paliwowo-energetycznych konieczne jest wypracowanie wieloletniej strategii energetycznej, która uwzględni rosnące potrzeby odbiorców indywidualnych oraz przemysłowych, a jednocześnie zapewni bezpieczeństwo energetyczne. Dlatego od kilku lat podejmowane są próby określenia nowego modelu strategii energetycznej, która z jednej strony uwzględniałaby potrzeby odbiorców, a z drugiej odpowiadałaby na wyzwania stawiane przez Unię Europejską. Możliwa do zrealizowania strategia energetyczna powinna uwzględniać nasze zasoby naturalne, których głównym źródłem jest węgiel oraz w znacznym stopniu zapewniać dużą samowystarczalność. Możliwe jest także zwiększenie wydobycia gazu z zasobów krajowych, w tym być może, złóż gazu z łupków. Rozważa się także budowę elektrowni jądrowych. Ogromne znaczenie będzie miało także wykorzystanie źródeł odnawialnych; jest to tym bardziej istotne, że zwiększony udział energii odnawialnych w bilansie energetycznym państw członkowskich popiera Unia Europejska.

System paliwowo-energetyczny to złożony system zależności występujących pomiędzy poszczególnymi elementami składowymi. Relacje, jakie zachodzą pomiędzy poszczególnymi podsystemami, są głównym kryterium prowadzenia badań nad prognozowaniem rozwoju systemu energetycznego. Modelowanie systemów energetycznych jest zadaniem czasochłonnym, wymagającym interdyscyplinarnej wiedzy (między innymi z zakresu matematyki, informatyki, energetyki, polityki energetycznej, ekonomii, demografii, ochrony środowiska itd.) oraz bardzo dobrej znajomości modelowanych sektorów. Jest to operacja złożona, wymagająca zastosowania odpowiedniej metodyki postępowania w celu uniknięcia błędów, które mogą się pojawić praktycznie na każdym etapie budowy. Analiza rozwoju energetyki wymaga odpowiednich narzędzi. Ilość problemów oraz ich złożoność sprawiają, że jedynym narzędziem, które umożliwia w miarę pełne odwzorowanie systemu energetycznego są modele matematyczne (Kudęłko 2005; Kamiński 2010; Popławski 2012).

## 1. Metodyka modelowania systemów energetycznych

Modelowanie rozwoju systemu energetycznego ma istotne ograniczenia. Wraz z postępem procesów liberalizacji sektorów energetycznych pojawiły się nowe czynniki determinujące proces wyboru technologii wytwórczych. Ze względu na ryzyko związane z działalnością na rynku konkurencyjnym, inwestorzy zaczęli preferować technologie z krótkim okresem zwrotu nakładów i krótkim okresem budowy. Na sektor energetyczny w coraz większym stopniu oddziałują także polityka w zakresie ochrony środowiska, w tym konieczność redukcji emisji CO<sub>2</sub>. Wymusza to zmianę w kierunkach rozwoju sektora wytwórczego, zwłaszcza na korzyść czystych technologii węglowych oraz energii jądrowej, a także z odnawialnych źródeł energii

(w tym systemów zdecentralizowanych). Wybór przyszłych technologii będzie uzależniony od wielu czynników. Zestawienie podstawowych cech technologii wytwórczych przedstawiono w tabeli 1.

Skomplikowany charakter relacji zachodzących w systemach energetycznych powoduje, że w procesie modelowania systemu niezbędne jest zastosowanie wielu uproszczeń. Ponadto duży wpływ na wiarygodność wykonywanych analiz i prognoz ma materiał statystyczny, który bardzo często jest niewystarczający. W prognozach energetycznych stosuje się trzy podstawowe metody modelowania:

- ✧ ekonometryczną – jest to metoda, która bazuje na statystycznej analizie danych historycznych i budowie modeli opisujących procesy ekonomiczne dla celów prognostycznych,
- ✧ optymalizacyjną, która wykorzystuje metody programowania matematycznego dla ustalenia optymalnej struktury systemu,
- ✧ symulacyjną, w której system jest przedstawiany za pomocą zbioru formuł opisujących pojedyncze, wzajemnie powiązane procesy, a prognoza jego rozwoju jest wyliczana jako wynik współdziałania tych procesów w czasie (Suwała 2013).

TABELA 1. Zestawienie cech technologii energetycznych

TABLE 1. Summary of the characteristics of energy technologies

Technologia	Wielkość jednostki	Okres projektowania i wdrażania	Koszty kapitału/kW	Koszty operacyjne	Koszty paliwa	Emisje CO <sub>2</sub>	Rola w systemie w sytuacjach awaryjnych
Elektrownie gazowe	średnia	krótki	niskie	niskie	wysokie	średnia	duża
Elektrownie gazowo-parowe	średnia	krótki	niskie	niskie	wysokie	średnia	średnia
Elektrownie węglowe	duża	długi	wysokie	średnia	średnia	wysokie	duża
Elektrownie jądrowe	bardzo duża	długi	wysokie	średnia	niskie	brak	–
Elektrownie wodne	duża	długi	bardzo wysokie	bardzo niskie	brak	brak	duża
Elektrownie wiatrowe	mała	krótki	wysokie	bardzo niskie	brak	brak	–
Elektrownie z silnikami tłokowymi	mała	bardzo krótki	niskie	niskie	wysokie	średnia	mała
Ogniwa paliwowe	mała	bardzo krótki	bardzo wysokie	średnia	wysokie	średnia	–
Ogniwa fotowoltaiczne	mała	bardzo krótki	bardzo wysokie	bardzo niskie	brak	brak	–

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Projected 2005; Projected 2010

Narzędzia analityczne, tworzone do badań rozwoju systemów energetycznych, wykorzystują dwie podstawowe techniki modelowania: *bottom-up* i *top-down*. W modelach *bottom-up* uwzględnia się zarówno stronę podażową, czyli pozyskanie nośników energetycznych oraz technologie konwersji, jak i stronę popytową, która charakteryzowana jest przez zapotrzebowanie na poszczególne rodzaje energii finalnej. Jest to tzw. podejście inżynierskie oparte na tworzeniu złożonych symulacji systemu energetycznego, uwzględniających szeroki zakres opisujących go danych (np. o sieci energetycznej, konkretnych technologiach produkcji, etapach przetwarzania energii). Modele tego typu pozwalają na dobre odwzorowanie systemu energetycznego. Cechą tych modeli jest brak powiązań systemu energetycznego z resztą gospodarki, natomiast kryterium decyzyjne to minimalizacja kosztów bezpośrednich.

Alternatywne podejście *top-down* skupia się na zbudowaniu modelu całej gospodarki, w którym sektor energetyczny jest tylko jednym z elementów, oddziałującym na otoczenie i odczuwającym efekty sprzężenia zwrotnego. Modele typu *top-down*, czyli modele równowagi ogólnej, obejmują stronę podażową i popytową. Oparte są na założeniach idealnego rynku oraz równowagi pomiędzy produkcją i popytem. Modele te zakładają konieczność uwzględnienia kosztów zewnętrznych w decyzjach producentów energii, np. koszty emisji. Mankamentem tej metody jest konieczność uproszczenia modelu samego sektora energetycznego i pominięcie szczegółów technicznych, które mogą być istotne, szczególnie w krótszym okresie (Kudelko 2005; Kamiński 2007, 2010; Popławski 2012; Herbst i in. 2012).

Coraz powszechniej wykorzystuje się modele mieszane, łączące w ramach jednej analizy moduły *top-down* i *bottom-up*. Wyniki symulacji *bottom-up* dostarczają wtedy danych dla modelowania *top-down* i na odwrót. Modele służące do prognozowania rozwoju systemów paliwowo-energetycznych można podzielić na:

- ✧ modele systemów energetycznych,
- ✧ modele energetyczno-ekonomiczne,
- ✧ zintegrowane modele energetyczno-ekonomiczno-środowiskowe.

Modele systemów energetycznych wykorzystują podejście inżynierskie (*bottom-up*), gdzie nie ma potrzeby analizowania zachowań pozostałych rynków nie związanych z produkcją energii. W związku z tym niezbędne dane o popycie na pierwotne nośniki energii oraz energię finalną pochodzą z prognoz makroekonomicznych. W modelach systemów energetycznych paliwa konkurują ze sobą na rynku dostaw energii pierwotnej, a technologie produkcyjne w zakresie ich przetwarzania. Najważniejsze zmienne modelu to: wielkość zużycia pierwotnych nośników energetycznych, wielkość produkcji energii elektrycznej i ciepła, poziom nakładów inwestycyjnych, emisja zanieczyszczeń gazowych itp. Do najbardziej znanych modeli tego typu należą MARKAL i MESSAGE.

Modele energetyczno-ekonomiczne wykorzystywane są do analizy powiązań systemu energetycznego z gospodarką. Są to modele makroekonomiczne, posiadające bardziej rozbudowaną – w stosunku do poprzednich – strukturę zależności ekonomicznych. Modele te wykorzystują tzw. podejście *top-down* i oparte są na teorii równowagi ogólnej. Określają one stronę podażową i popytową zależnościami rynkowymi. Przykładami modeli wykorzystanymi w badaniach nad sektorami energetycznymi są: GLOBAL 2100, GREEN, Dynamic General Equilibrium Model i PRIMES.

Zintegrowane modele energetyczno-ekonomiczno-środowiskowe łączą kilka wyspecjalizowanych i uzupełniających się wzajemnie modeli, ze względu na wielopłaszczyznowy charakter analizy. W badaniach tego typu dąży się do szczegółowego odwzorowania istotnych relacji technologicznych, ekonomicznych i środowiskowych, a z uwagi na trudności obliczeniowe nie dokonuje się tego w jednym modelu, lecz poprzez zastosowanie wcześniej stworzonych narzędzi (Kudelko 2005; Kamiński 2007, 2010; Popławski 2012; Herbst i in. 2012).

## 2. Charakterystyka wybranych modeli

Model MARKAL (*MARKet ALlocation*) jest narzędziem wykorzystanym do programowania modeli rozwoju systemów energetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem struktury wytwórczej, na podstawie bilansu energii (Jaskólski 2012). Model MARKAL pozwala na rozwiązywanie problemów programowania liniowego opartych na minimalizacji zaktualizowanej wartości netto kosztów dostawy energii do odbiorcy końcowego. Zmiennymi decyzyjnymi są m.in.: wielkość mocy zainstalowanej i wielkość rocznej produkcji w technologiach przetwarzania różnych form energii. Kryterium optymalizacji zastosowanym w modelu MARKAL jest minimalizacja zdyskontowanej sumy zaktualizowanej wartości strumienia kosztów rocznych, generowanych przez system energetyczny we wszystkich latach horyzontu czasowego.

Model POLES należy do grupy pięciu globalnych modeli typu energia–ekologia–ekonomika (3E). Model ułatwia jednoczesną ocenę opcji popytowych i podażowych przy różnych ograniczeniach, w szczególności obejmujących dostępność zasobów i cele emisyjne. Model POLES uwzględnia dwa podstawowe czynniki, warunkujące zapotrzebowanie energii: potencjał demograficzny i przyrost PKB na mieszkańca (Malko 2011; Kamiński 2007).

Model LEAP (*The Long-range Energy Alternatives Planning System*), to rozwinięte przez Stockholm Environment Institute wykorzystywane narzędzie do analizy polityki energetycznej. Służy do zintegrowanego planowania energetycznego oraz analizy zmian klimatycznych. Jest użytkowany w wielu różnych skalach, od miast i regionów, do zastosowań krajowych czy kontynentalnych, uwzględniając problem emisji. W programie LEAP nie zaimplementowano modelu konkretnego systemu energetycznego. Stanowi on narzędzie, które może być używane do tworzenia modeli różnych systemów energetycznych. LEAP umożliwia korzystanie także z szeregu opcjonalnych wyspecjalizowanych metod modelowania, obejmujących na przykład zużycie energii (paliw) w sektorze transportu, czy obciążenia systemu elektroenergetycznego. LEAP oferuje szereg metod symulacji, które są wystarczające do modelowania sektora wytwarzania energii elektrycznej i planowania rozbudowy jego zdolności produkcyjnych. Model LEAP jest przeznaczony do modelowania długookresowego, w obliczeniach można stosować roczny krok czasowy, a horyzont czasowy można rozszerzyć na nieograniczoną liczbę lat ([www.regna.eu](http://www.regna.eu); [www.energycommunity.org](http://www.energycommunity.org)).

Model EnergyPLAN jest modelem komputerowym przeznaczonym do analizy systemów energetycznych. Jest to model deterministyczny, który optymalizuje działanie danego systemu

energetycznego na podstawie danych wejściowych i wyjściowych, określonych przez użytkownika. Głównym celem modelu jest pomoc w projektowaniu krajowych lub regionalnych strategii planowania energetycznego na podstawie analiz technicznych i ekonomicznych skutków realizacji różnych systemów energetycznych i inwestycji. Model obejmuje cały krajowy lub regionalny system energetyczny, w tym produkcję ciepła i elektryczności, a także transport i przemysł ([www.energyplan.eu](http://www.energyplan.eu)).

Model MAED ocenia przyszłe zapotrzebowanie na energię opierając się na średnio- i długoterminowych scenariuszach rozwoju społeczno-gospodarczego, technologicznego i demograficznego. Zapotrzebowanie na energię w tym modelu dzieli się na dużą liczbę kategorii użytkowników końcowych, odpowiadających różnym usługom, w różnych sektorach. Szacowane są czynniki społeczne, ekonomiczne i technologiczne z danego scenariusza, które połączone dają ogólny obraz przyszłego wzrostu zapotrzebowania na energię. MAED wykorzystuje makroprogramu Excel (Model 2006). Model ten został wykorzystany przy opracowaniu Prognozy zapotrzebowania na paliwa i energię do 2030 roku, Załącznik 2 do projektu *Polityki energetycznej Polski do 2030 roku*.

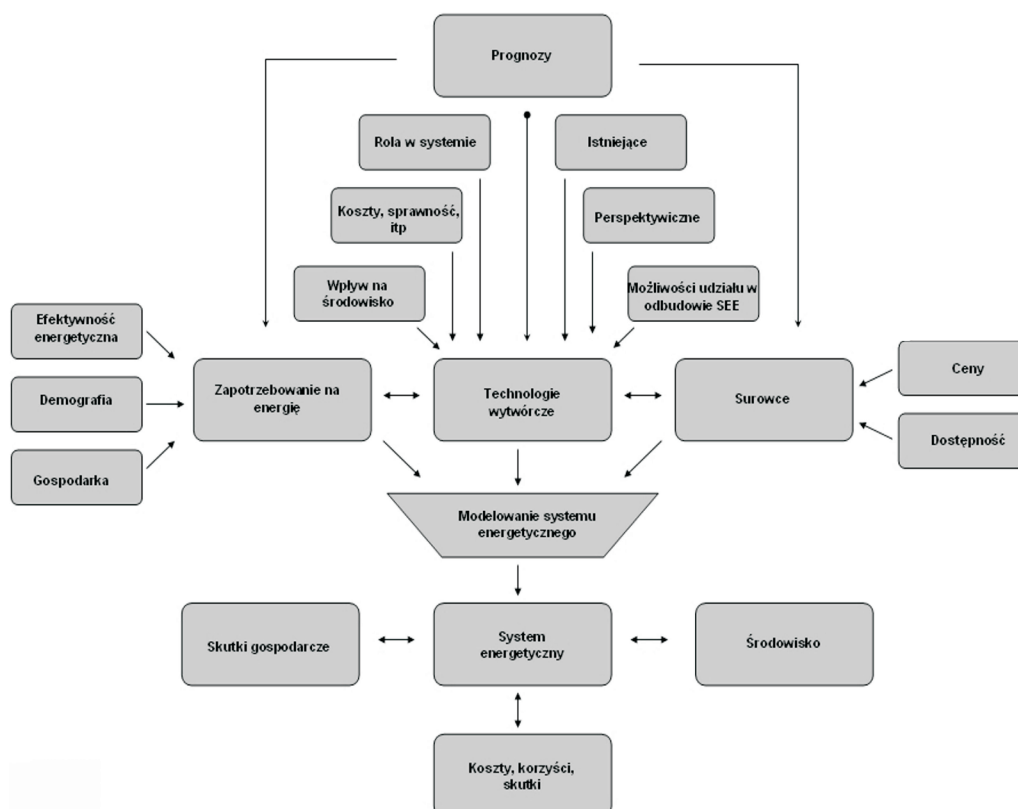
Model optymalizacyjny MESSAGE pozwala na wyznaczenie prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło sieciowe oraz prognozy rozwoju źródeł wytwarzania w skali kraju. Zasada działania modelu MESSAGE opiera się na minimalizacji sumarycznych zdyskontowanych kosztów systemowych w całym rozpatrywanym przedziale czasowym, wykorzystując metody programowania liniowego. MESSAGE umożliwia budowę modelu systemu energetycznego o praktycznie dowolnej złożoności, zawierającego technologie wytwarzania i przesyłu paliw i energii, uwzględniającego większość ograniczeń technicznych i środowiskowych występujących w rzeczywistym systemie. Daje to szerokie możliwości symulacji zachowania systemu w różnych warunkach oraz badania wpływu poszczególnych czynników na dobór optymalnej struktury technologii ([www.energyplan.eu](http://www.energyplan.eu); <http://webarchive.iiasa.ac.at>). Wiele elementów tego modelu zostało wykorzystanych podczas tworzenia *Modelu optymalnego miks energetycznego dla Polski do roku 2060*.

Model PRIMES symuluje rozwiązania dla rynkowej równowagi podaży i popytu. Algorytmy modelu poszukują cen dla każdej postaci energii, przy których ilościowe zapotrzebowanie konsumenta jest najlepiej zaspokajane przez ilościową ofertę producentów. Model oddaje zachowania uczestników rynku oraz wykorzystuje dostępne technologie popytowe i podażowe oraz technologie ograniczania emisji. Model wyróżnia podsystemy podażowe (produktów ropopochodnych, gazu, węgla, energii elektrycznej, ciepła i pozostałe) oraz sektory użytkownika końcowego (mieszkalnictwo, usługi, transport, dziewięć sektorów przemysłu), przy czym możliwe jest łączenie funkcji producenta i konsumenta (na przykład w procesach kogeneracyjnych) (Capros 2008).

Wspomniany wyżej *Model optymalnego miks energetycznego dla Polski do roku 2060* ma charakter modelu liniowej optymalizacji i koncentruje się na technologiach zamiany paliw na energię elektryczną. Jego celem jest określenie miks energetycznego, w podziale na źródła energii, który zapewni odpowiednią rezerwę mocy w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym oraz realizację wiążących Polskę celów pakietu energetyczno-klimatycznego (PEK) Unii Europejskiej. Model został zaimplementowany w środowisku R. Model uwzględnia czas budowy i życia różnego rodzaju instalacji oraz krajowe zasoby surowców.

Model jest też łatwo rozszerzalny, pozwala w prosty sposób dodawać nowe źródła energii (Gołębiowski i in. 2013).

Istotną wadą większości modeli symulacyjnych jest fakt, że aby taki model stworzyć konieczne są pewne uproszczenia. Z punktu widzenia systemu elektroenergetycznego ważną kwestią, która nie jest poruszana podczas budowy modelu jest przydatność nowo planowanych źródeł wytwórczych do odbudowy systemu po awarii katastrofalnej (rys. 1). Możliwość odbudowy systemu po *blackoucie* jest ważnym aspektem bezpieczeństwa energetycznego, o którym nie można zapominać. Plany obrony Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) przed awarią zawierają zasady postępowania Operatorów Systemów oraz innych podmiotów przyłączonych do KSE w warunkach pracy zakłóceń system elektroenergetycznego. Plany obrony mają za zadanie uniknięcie awarii katastrofalnej, a w przypadku, gdyby doszło do zakłócenia, powstrzymanie rozprzestrzeniania oraz szybką likwidację awarii niezależnie od miejsca jej wystąpienia. W sytuacji, gdy z powodu wielkości awarii działania obronne okażą się niewystarczające i dojdzie do *blackout'u*, kolejne kroki powinny przygotować system elektroenergetyczny do szybkiej odbudowy. W tym celu konieczne jest przygotowanie torów prądowych do podania mocy rozruchowej ze źródeł pozostających w ruchu do



Rys. 1. Schemat ideowy modelu strategii rozwoju systemu energetycznego (opracowanie własne)

Fig. 1. Schematic diagram of the model of the development strategy for the energy system

uruchamianych źródeł wytwórczych. Źródłami mocy rozruchowej mogą być np. elektrownie posiadające zdolność do samostartu (elektrownie wodne lub gazowe), bloki elektrowni lub elektrociepłowni, które mogą przejść do pracy na potrzeby własne lub do pracy wydzielonej.

Planując modele systemu energetycznego należy także pamiętać o rozwoju systemu przesyłowego. Plany rozbudowy sieci często ulegają zmianom lub są wstrzymywane ze względu na niedoskonałości natury prawnej.

## Podsumowanie

Obecny poziom rezerw mocy w Krajowym Systemie Energetycznym (KSE) jest wysoki i na razie przekracza kryterialne wymagania bezpieczeństwa. Zagrożenia w tym zakresie mogą pojawić się w niedalekiej przyszłości i w głównej mierze zależą od relacji pomiędzy wzrostem krajowego zapotrzebowania a przyrostem nowych mocy wytwórczych. Należy wziąć pod uwagę także dyrektywy Unii Europejskiej, które dotyczą ochrony środowiska. Wpływ tych dyrektyw, nakładających ostrzejsze wymagania od dotychczasowych sprawi, że duża część naszych mocy wytwórczych będzie musiała być wycofana z ruchu albo zmodernizowana. W tym miejscu należy sobie jednak zdać sprawę z tego, że z uwagi na długi cykl realizacji inwestycji wytwórczych (około 3–5 lat) i przesyłowych (około 10 lat) decyzje o ich budowie powinny być podejmowane z odpowiednio dużym wyprzedzeniem.

Jednym z warunków zapewnienia bezpieczeństwa dostawy energii elektrycznej do odbiorców jest utrzymywanie równowagi między zapotrzebowaniem na energię elektryczną i moc szczytową a dostępnością mocy wytwórczych w KSE. Porównanie obecnego stanu i struktury mocy źródeł wytwórczych w KSE oraz zapotrzebowania na energię elektryczną i moc szczytową, a także przewidywanego w najbliższych latach jego wzrostu, wskazuje, że w polskiej elektroenergetyce są pilnie potrzebne nowe inwestycje źródeł wytwórczych. Wybór technologii dla nowych źródeł wytwórczych w długiej perspektywie czasowej musi być jednak oparty nie tylko na kryterium ekonomicznym, którego podstawą jest znajomość przewidywanych, całkowitych kosztów wytwarzania energii elektrycznej, łącznie z kosztami środowiskowymi, ale także uwzględniać dostępność paliw i technologii.

Dochodzenie do odpowiedniego modelu energetyki to długi i trudny proces. Obecnie niezbędne jest podejmowanie działań zabezpieczających bezpieczeństwo energetyczne Polski w zakresie niezakłóconych dostaw tradycyjnych nośników energii, głównie gazu i ropy naftowej poprzez ich dywersyfikację. Perspektywa deficytu energii powoduje, że już dziś trzeba się zastanawiać, czy i co budować. Wydaje się, że w obecnej sytuacji trzeba stawiać na górnictwo węgla kamiennego i brunatnego, a także na odnawialne źródła energii i na energetykę jądrową – bowiem każda forma energii będzie w naszym systemie energetycznym coraz bardziej potrzebna. Należy jednak zastanowić się jaki będzie optymalny miks energetyczny, który zapewni nieprzerwane dostawy energii, a także stabilną pracę systemu elektroenergetycznego. Powinien to być miks, który również w sytuacjach awarii systemowych nie będzie sprawiał problemów operatorom systemu z jego odbudową.



## Literatura

- [1] CAPROS, P. 2008. *The PRIMES Energy System Model*. National Technical University of Athens.
- [2] GOŁĘBIEWSKI i in. 2013 – GOŁĘBIEWSKI, P., KLIMA, G., MARCINIAK, M., PARFIENIUK, P. i SOWIŃSKA, A. 2013. *Model optymalnego miks energetycznego dla Polski do roku 2060*. Wersja 2.0, Departament Analiz Strategicznych, Warszawa, 12 listopada 2013.
- [3] HERBST i in. 2012 – HERBST, A., TORO, F., REITZE, F. i JOCHEM, E. 2012. Introduction to Energy Systems Modelling. *Swiss Journal of Economics and Statistics* Vol. 148(2), s. 111–135.
- [4] <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/ENE/model/message.html>
- [5] <http://www.energycommunity.org>
- [6] <http://www.energyplan.eu>
- [7] <http://www.regna.eu>
- [8] JASKÓLSKI, M. 2012. Application of MARKAL model to optimisation of electricity generation structure in Poland in the long-term time horizon Part I – concept of the model. *Acta Energetica* 3/12, s. 15–20.
- [9] KAMIŃSKI, J. 2007. Liberalizacja rynku energii elektrycznej a zużycie węgla w sektorze elektroenergetycznym – ujęcie modelowe. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 10, z. 2, s. 253–275.
- [10] KAMIŃSKI, J. 2010. Modelowanie systemów energetycznych – ogólna metodyka budowy modeli. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 13, z. 2, s. 219–226.
- [11] KUDEŁKO, M. 2005. Znaczenie analizy systemowej w prognozowaniu rozwoju sektorów paliwowo-energetycznych. Polski. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 8, z. spec., s. 245–260.
- [12] MALKO, J. 2011. Model „POLES” – ocena transformacji energetyki XXI wieku. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 14, z. 1, s. 107–121.
- [13] Model For Analysis Of Energy Demand (MAED-2), IAEA, Vienna, 2006.
- [14] POPŁAWSKI, T. 2012. Problematyka budowy modelu długoterminowej prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną dla Polski. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 3, s. 293–304.
- [15] Projected Cost of Generating Electricity 2005, 2005 – OECD PUBLICATIONS.
- [16] Projected Costs of Generating Electricity 2010, 2010 – OECD PUBLICATIONS.
- [17] SUWAŁA, W. 2013. Problemy budowy i wykorzystania modeli komputerowych w gospodarce paliwami i energią. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 47–58.

Radosław SZCZERBOWSKI

## Modelling of energy systems – characteristics of selected models

### Abstract

A number of changes occurring in the energy sector are dependent on factors not only related to technology and the economy, but also to social and political conditions. Presently, the Polish energy sector faces serious challenges. The high demand for final energy, the inadequate capacity of production and transfer infrastructure, the dependence on external gas and crude oil supplies, and the requirements to comply with climate and environmental protection mandates make it necessary to take serious actions. In order to achieve a correctly functioning energy system, a crucial element is to monitor and forecast instant changes in the state of the system over different time horizons. The complexity of fuels and energy systems development makes mathematical modeling the basic tool for their analyses. Decisions regarding energy or environmental policy regulation are always preceded by an impact assessment, which is an analysis performed using a variety of models.

KEY WORDS: energy safety, energy mix, energy policy, energy systems modelling