

Radosław SZCZERBOWSKI\*

## MODELOWANIE SYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH

Jednym z ważniejszych sektorów gospodarki narodowej jest sektor energetyczny. Szereg zmian zachodzących w tym sektorze 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. Żadna decyzja o wprowadzeniu regulacji w zakresie polityki energetycznej i ekologicznej nie obejdzie się bez wcześniejszych badań skutków, które można oszacować właśnie za pomocą modeli.

SŁOWA KLUCZOWE: system energetyczny, polityka energetyczna, modele systemów energetycznych

### 1. WPROWADZENIE

Od kilku lat temat związany z przyszłością energetyki stanowi jeden z najważniejszych problemów w polityce krajowej. Obecny stan bezpieczeństwa energetycznego w poszczególnych sektorach polskiej energetyki jest mocno zróżnicowany. 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 jak dotąd jest niewielkie. W oparciu o bilanse paliwowo-energetyczne 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

---

\* Politechnika Poznańska.

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 łupkowego. Ogromne znaczenie będzie miało także wykorzystanie odnawialnych, jest to tym bardziej istotne, że zwiększony udział energii odnawialnych w bilansie energetycznym państw członkowskich popiera Unia Europejska. Coraz częściej rozważa się także budowę elektrowni jądrowych.

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) oraz bardzo dobrej znajomości modelowanego sektora. Jest to operacja złożona, wymagająca zastosowania odpowiedniej metodyki postępowania w celu uniknięcia błędów, które mogą się pojawić praktycznie na każdym etapie budowy [4, 5, 6].

## **2. METODYKA MODELOWANIA SYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH**

Modelowanie rozwoju systemu energetycznego ma istotne ograniczenia. Wraz z postępowaniem 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 oddziaływać będzie także polityka w zakresie ochrony środowiska, w tym konieczność redukcji emisji CO<sub>2</sub>. Wymusza to diametralną zmianę w kierunkach rozwoju sektora wytwórczego, zwłaszcza na korzyść czystych technologii węglowych oraz energii jądrowej, a także na korzyść źródeł energii odnawialnych (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 (rys. 1). Ponadto duży wpływ na wiarygodność 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 [15].

Narzędzia analityczne, które tworzone są 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, a także stronę popytową, która charakteryzowana jest przez zapotrzebowanie na poszczególne rodzaje energii finalnej. Cechą tych modeli jest brak powiązań systemu energetycznego z resztą gospodarki, natomiast kryterium decyzyjne to minimalizacja kosztów bezpośrednich. 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 [4, 5, 6, 13].

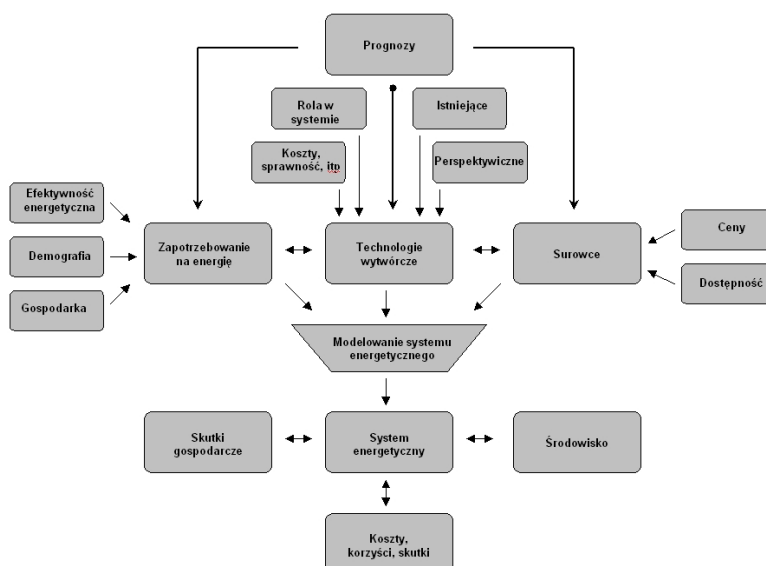
Tabela 1. Zestawienie cech technologii energetycznych [1, 2]

Technologia	Wielkość jednostki	Okres projektowania i wdrażania	Koszty kapitału/kW	Koszty operacyjne	Koszty paliwa	Emisje CO <sub>2</sub>	Ryzyko regulacyjne
CCGT	Średnia	Krótki	Niskie	Niskie	Wysokie	Średnia	Niskie
Elektrownie węglowe	Duża	Długi	Wysokie	Średnia	Średnia	Wysokie	Wysokie
Elektrownie jądrowe	Bardzo duża	Długi	Wysokie	Średnia	Niskie	Brak	Wysokie
Elektrownie wodne	Duża	Długi	Bardzo wysokie	Bardzo niskie	Brak	Brak	Wysokie
Elektrownie wiatrowe	Mała	Krótki	Wysokie	Bardzo niskie	Brak	Brak	Średnia
Elektrownie z silnikami tłokowymi	Mała	Bardzo krótki	Niskie	Niskie	Wysokie	Średnia	Średnia
Ogniwa paliwowe	Mała	Bardzo krótki	Bardzo wysokie	Średnia	Wysokie	Średnia	Niskie
Ogniwa fotowoltaiczne	Bardzo mała	Bardzo krótki	Bardzo wysokie	Bardzo niskie	Brak	Brak	Niskie

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 pochodzi 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.



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

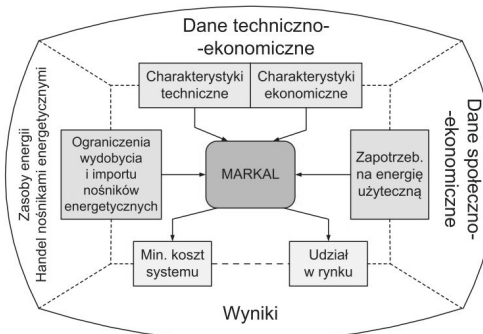
Modele energetyczno-ekonomiczne, wykorzystywane są do analizy powiązań systemu energetycznego z gospodarką. Są to modele makroekonomiczne, posiadające bardziej rozbudowaną, w stosunku do poprzednich, strukturę zależności ekonomicznych. Modele te wykorzystują tzw. podejście top-down, oparte są na teorii 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 zatem 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 [4, 5, 6, 13].

### 3. 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 [3]. 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. Schemat ideowy struktury danych wejściowych i rezultatów uzyskiwanych za pomocą modelu MARKAL przedstawiono na rys. 2. Kryterium optymalizacji zastosowane w modelu MARKAL jest minimalizacja zdyskontowanej sumy zaktualizowanej wartości strumienia kosztów rocznych, generowanych przez system energetyczny we wszystkich latach horyzontu czasowego.



Rys. 2. Schemat ideowy struktury modelu budowanego za pomocą pakietu MARKAL [3]

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 [7, 13].

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, lecz stanowi on narzędzie, które można stosować 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 [8, 9].

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 produkcji ciepła i elektryczności, a także transport i przemysł [10].

Model MAED ocenia przyszłe zapotrzebowanie na energię w oparciu o średnio-i długoterminowe scenariusze 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 i połączone dają ogólny obraz przyszłego wzrostu zapotrzebowania na energię. MAED wykorzystuje makra programu Excel [11]. 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 [10,12]. 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 użytkowania końcowego (mieszkalnictwo, usługi, transport, dziewięć sektorów przemysłu), przy czym możliwe jest łączenie funkcji producenta i konsumenta (na przykład w procesach kogeneracyjnych) [14].

#### 4. WNIOSKI

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 Krajowym Systemie Energetycznym (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 pilnie są potrzebne nowe inwestycje źródeł wytwórczych. Wybór technologii dla nowych źródeł wytwórczych w długiej perspektywie czasowej musi być jednak oparty tylko na kryterium ekonomicznym, którego podstawą jest znajomość przewidywanych, całkowitych kosztów wytwarzania energii elektrycznej, łącznie z kosztami środowiskowymi.

Dochodzenie do odpowiedniego modelu energetyki będzie długim i trudnym procesem. 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.

#### LITERATURA

- [1] Projected Cost of Generating Electricity 2005, OECD PUBLICATIONS.
- [2] Projected Costs of Generating Electricity 2010, OECD PUBLICATIONS.
- [3] Jaskólski M., 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 (2012), str. 15-20.
- [4] Kudełko M., Znaczenie analizy systemowej w prognozowaniu rozwoju sektorów paliwowo-energetycznych. *Polski. Polityka Energetyczna* tom 8, z. specjalny. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, s. 245-260, Kraków 2005.

- [5] Kamiński J., Modelowanie systemów energetycznych - ogólna metodyka budowy modeli. *Polityka Energetyczna* tom 13, z. 2. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, s. 219 - 226. Kraków 2010.
- [6] Popławski T., Problematyka budowy modelu długoterminowej prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną dla Polski. *Polityka Energetyczna* tom 15, z. 3. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, s. 293 – 304, Kraków 2012.
- [7] Malko J., Model „POLES” – ocena transformacji energetyki XXI wieku, *Polityka Energetyczna* tom 14, z. 1, Wyd. Instytutu GSMiE PAN, s. 107-121, Kraków 2011.
- [8] <http://www.regna.eu>
- [9] <http://www.energycommunity.org>
- [10] <http://www.energyplan.eu>
- [11] Model For Analysis Of Energy Demand (MAED-2), IAEA, Vienna, 2006.
- [12] <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/ENE/model/message.html>
- [13] Kamiński J., Liberalizacja rynku energii elektrycznej a zużycie węgla w sektorze elektroenergetycznym - ujęcie modelowe. *Polityka Energetyczna* tom 10, z. 2. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, s. 253-275, Kraków 2007.
- [14] Capros P. The PRIMES Energy System Model, National Technical University of Athens, 2008.
- [15] Suwała W., Problemy budowy i wykorzystania modeli komputerowych w gospodarce paliwami i energią. *Polityka Energetyczna* tom 16, z. 3. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, s. 47 – 58, Kraków 2013.

### **MODELING OF ENERGY SYSTEMS**

One of the most important sectors of the national economy is the energy sector. A number of changes occurring in this sector are dependent on factors not only related to technology and the economy, but also on social and political conditions. The Polish energy sector faces serious challenges at the moment. The high demand for final energy, the inadequate level 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 on energy or environmental policy regulation are always preceded by impact assessment, which is an analysis performed using a variety of models.