

Jacek KAMIŃSKI*

Modelowanie systemów energetycznych: ogólna metodyka budowy modeli

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono ogólną metodykę postępowania przy budowie modeli systemów energetycznych. Podkreślono znacznie modeli w procesie podejmowania decyzji dotyczących sektora paliwowo-energetycznego. Przedstawiono 12-etapową procedurę budowy modeli, podkreślając znaczenie poszczególnych etapów oraz wskazując typowe problemy pojawiające się w trakcie ich realizacji. W podsumowaniu zawarto najważniejsze wnioski z analizy przeprowadzonej w artykule.

SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie, metodyka budowy modeli, sektor energetyczny

Wprowadzenie

Ze względu na specyficzną pozycję energii jako produktu badania dotyczące sektora energetycznego mają kluczowe znaczenie dla poprawnego funkcjonowania gospodarki. Duże fluktuacje cen nośników energii oraz istotne zachwiania dostaw zazwyczaj bardzo negatywnie wpływają na sytuację gospodarczą każdego kraju. Aby zmniejszyć ryzyko takich sytuacji konieczne jest prowadzenie badań średnio- i długoterminowych redukujących istotnie ryzyko w procesie podejmowania decyzji w zakresie funkcjonowania sektora

* Dr inż. – Zakład Polityki Energetycznej i Ekologicznej, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: kaminski@meeri.pl

paliwowo-energetycznego. Skutki podejmowania decyzji są zazwyczaj trudne do przewidzenia (zwłaszcza gdy horyzont czasowy jest odległy), przede wszystkim ze względu na złożoność relacji występujących w tym sektorze oraz powiązania z pozostałymi sektorami.

Przedstawione powyżej uwarunkowania determinują wybór odpowiedniej metody badawczej pozwalającej na uwzględnienie wpływu bardzo dużej liczby czynników na podmioty funkcjonujące w sektorze energetycznym oraz ich wpływ na pozostałe sektory. Metodą taką, od kilkudziesięciu lat stosowaną w świecie na szeroką skalę, jest analiza systemowa, której narzędziem oceny ilościowej są modele.

W literaturze przedmiotu istnieje wiele definicji pojęcia model. Ogólnie, model może być zdefiniowany jako: jakakolwiek reprezentacja rzeczywistych zjawisk, którymi mogą być realne systemy lub procesy [1]. Młynarski i in. definiują model jako [6]:

- ✧ wzorzec, do którego porównuje się oryginały,
- ✧ odwzorowanie rzeczywistości, będącej oryginałem.

Szczególne znaczenie w badaniach dotyczących sektora paliwowo-energetycznego ma druga definicja modelu, zgodnie z którą model jest pewnym narzędziem opisu rzeczywistych obiektów, funkcjonowania tych obiektów oraz zależności występujących między nimi. Stosowanie modelu do rozwiązywania rzeczywistych problemów umożliwia wnioskowanie na temat zachowania oryginału, który najczęściej nie jest dostępny do prowadzenia eksperymentów.

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. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie ogólnej metody postępowania w modelowaniu rozległych systemów energetycznych.

1. Procedura postępowania w modelowaniu systemów energetycznych

Modele matematyczne, opisujące formalnie związki zachodzące pomiędzy badanymi obiektami czy procesami poprzez zapisanie zależności rzeczywistych w postaci formuł matematycznych, umożliwiają między innymi przeprowadzenie symulacji i/lub optymalizacji systemu. Podstawową zaletą tego rodzaju badań jest możliwość względnie szybkiego i znacznie tańszego przeanalizowania potencjalnych skutków podejmowanych decyzji lub też wskazanie najkorzystniejszej z nich. Modelowanie matematyczne umożliwia więc przeanalizowanie potencjalnych rezultatów planowanych działań, których sprawdzenie na rzeczywistym systemie jest niemożliwe lub zbyt kosztowne. Odnosi się to w głównej mierze do złożonych systemów, takich jak sektor energetyczny. Dodatkową i niepodważalną zaletą

modelowania matematycznego jest możliwość zaprojektowania wielu scenariuszy badawczych, opisujących różne konfiguracje możliwe do wystąpienia w realnym systemie.

W procesie podejmowania decyzji z wykorzystaniem metodyki modelowania matematycznego konieczne jest przyjęcie określonej procedury postępowania. W niniejszym artykule została ona ujęta w dwunastu charakterystycznych etapach [8, 2]:

1. Rozpoznanie problemu – związane jest z uświadomieniem przez osobę podejmującą decyzje, że obecna sytuacja może nie być najlepszą z możliwych. Na tym etapie nie wiadomo jednak co jest tego powodem. Taki stan może trwać bardzo długo przed podjęciem decyzji o dokładniejszej analizie procesów zachodzących w określonym sektorze lub przedsiębiorstwie. Bardzo często informacja o nieefektywnym funkcjonowaniu jest celowo ignorowana ze względu na specyficzne uwarunkowania polityczne i społeczne.
2. Zdefiniowanie problemu – czyli wybranie ze zbioru wszystkich problemów jednego i dokładne określenie na czym on polega.
3. Obserwacja i analiza problemu – zazwyczaj na tym etapie problem (zdefiniowany na etapie 2) pojawia się w określonym punkcie systemu rozległego, w którym występuje szereg zależności między jego poszczególnymi elementami. Dlatego też konieczne jest prowadzenie obserwacji i analiza tego problemu w kontekście całego otoczenia. Ważne jest, aby nie zaniedbać połączeń z pozostałymi elementami systemu, gdyż może to zafałszować obraz całości. Wskazana jest komunikacja z ekspertami nie tylko w ramach sektora poddawanego dokładnej analizie, ale również innych powiązanych z nim w jakikolwiek sposób. Na tym etapie gromadzone i analizowane są dane.
4. Opracowanie modelu konceptualnego – w trakcie obserwacji i analizy problemu zbierane są różnego rodzaju informacje, które pozwalają na określenie, które elementy występujące w danym systemie są ważne i zostaną wzięte pod uwagę. Model konceptualny odzwierciedla zależności pomiędzy różnymi aspektami i elementami systemu oraz cel, jaki ma być osiągnięty.

W badaniach modelowych stosuje się zazwyczaj pewne uproszczenia w odwzorowaniu modelowanych systemów, co w praktyce wiąże się z agregacją elementów podobnych oraz eliminacją sprzężeń nieistotnych. Odwzorowanie wszystkich zależności występujących w oryginale nie prowadzi bowiem do osiągnięcia istotnie wiarygodniejszych wyników, a jedynie komplikuje model, który staje się przez to niezrozumiały i trudny zarówno w korygowaniu jak i w praktycznym zastosowaniu. Każdy rzeczywisty system jest na tyle złożony, że nakład pracy włożony w precyzyjne ujęcie każdej zależności jest nieadekwatny do możliwych do osiągnięcia korzyści. Stopień szczegółowości ujęcia systemu powinien więc być dostosowany do celu badań i oczekiwań co do szczegółowości wyników. Z drugiej strony, jeśli pewne istotne elementy nie zostaną włączone do modelu, może on w niewystarczający sposób odzwierciedlać rzeczywistość.

Na tym etapie definiuje się więc podstawowe elementy modelu oraz zależności występujące między nimi. Ponadto, określa się stopień szczegółowości oraz horyzont czasowy. Model konceptualny musi zostać sprawdzony pod kątem dokładności i wystarczalności odzwierciedlenia rzeczywistego systemu. Powinien być również przeanalizowany przez ekspertów oraz skorygowany stosownie do ich sugestii.

5. Sformułowanie modelu matematycznego – na tym etapie następuje transformacja zależności określonych w modelu konceptualnym na relacje matematyczne. Zazwyczaj jest to procedura skomplikowana, gdyż niejednokrotnie występują trudności w dopasowaniu zależności matematycznych do konceptualnych, z wykorzystaniem racjonalnej liczby zmiennych i ograniczeń. Bardzo często wymagany jest powrót do poprzedniego etapu i dostosowanie modelu konceptualnego do możliwości praktycznej implementacji modelu na platformie komputerowej.

Na tym etapie dokonuje się również wyboru właściwej metody programowania matematycznego, zawierającego szereg algorytmów umożliwiających wyznaczenie ekstremalnych (minimum lub maksimum) wartości funkcji celu przy zadanych ograniczeniach. W zależności od rodzaju modelu wyróżnić można następujące metody [3, 4]:

- ✧ liniowe (LP),
- ✧ nieliniowe (NLP),
- ✧ całkowitoliczbowe (IP),
- ✧ mieszane liniowe i nieliniowe (MIP, MILP, MINLP),
- ✧ mieszane komplementarne (MCP, LCP, NCP).

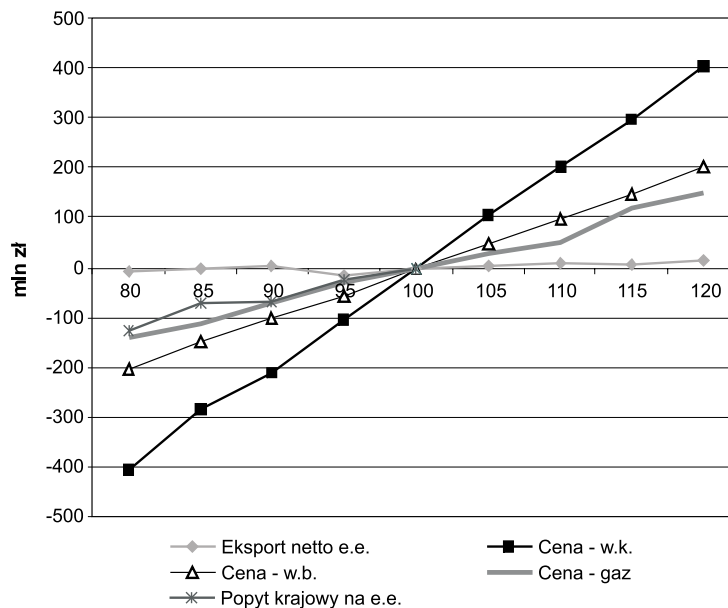
Ze względu na efektywne algorytmy obliczeniowe, najczęściej stosowana jest metoda programowania liniowego (LP). W przypadku najbardziej rozbudowanych modeli stosowanie tej metody jest niemal regułą. Jej podstawową wadą jest konieczność przyjęcia szeregu uproszczeń. Ze względu na wymóg liniowej postaci kryterium optymalizacji (funkcji celu) i ograniczeń, stosowanie tej metody nie jest możliwe w przypadku modeli, w których funkcjonują związki nieliniowe pomiędzy elementami systemu. W takiej sytuacji zastosowanie ma metoda programowania nieliniowego (NLP), której stosowanie jest jednak bardzo ograniczone ze względu na trudności obliczeniowe. Pomimo wzrostu efektywności metod modelowania nieliniowego i wydajności jednostek obliczeniowych, dostępne obecnie algorytmy zazwyczaj radzą sobie jedynie z mało skomplikowanymi problemami o silnych ekstremach. Programowanie całkowitoliczbowe (IP) znajduje zastosowanie w sytuacji, gdy zaimplementowane zmienne mogą przyjmować wartości całkowite. Szczególnym przypadkiem programowania całkowitoliczbowego jest programowanie binarne, w którym zmienne przyjmują tylko wartość 0 bądź 1. Programowanie binarne ma zastosowanie między innymi w modelowaniu działań restrukturyzacyjnych (np. w którym roku ma rozpocząć lub zakończyć działalność dane przedsiębiorstwo energetyczne) [9, 10, 11]. Niestety podobnie jak w przypadku programowania nieliniowego, w programowaniu całkowitoliczbowym występują najczęściej pewne problemy obliczeniowe. Połączenie programowania liniowego lub nieliniowego z całkowitoliczbowym to programowanie mieszane (MIP, MILP, MINLP). Obecnie na szeroką skalę między innymi do modelowania rynków energii elektrycznej stosowane jest programowanie komplementarne (MCP) [7].

Jeśli zakłada się opracowanie modelu liniowego, konieczne jest opisanie systemu liniowymi zależnościami pomiędzy zmiennymi. Często model budowany jest stopniowo poprzez zbudowanie w pierwszej kolejności uproszczonego modelu uwzględniającego najważniejsze zmienne i ograniczenia. Następnie po sprawdzeniu poprawności działania takiego modelu rozbudowuje się go o następne bardziej skomplikowane elementy.

Model matematyczny powinien być weryfikowany na każdym etapie jego budowania. Minimalizuje to prawdopodobieństwo popełnienia błędu ułatwiając znalezienie „na bieżąco” ewentualnych nieprawidłowości. Konieczne jest także analizowanie, czy czasy obliczeń są akceptowalne, gdyż nawet bardzo dobry model może być w praktyce niewykorzystywany w przyszłości przez decydentów, jeśli jego rozwiązanie trwałoby kilka dni lub tygodni.

Na tym etapie konieczne jest również wzięcie pod uwagę uwarunkowań dotyczących struktury rynkowej modelowanego sektora. Zarówno w przypadku monopolistycznej struktury systemu energetycznego, jak i w przypadku konkurencji doskonałej zasadnym jest budowa modelu, którego funkcją celu jest maksymalizacja zysku lub minimalizacja kosztów prowadzonej działalności jednego przedsiębiorstwa (w przypadku monopolu) lub nieskończonej liczby przedsiębiorstw (w przypadku konkurencji doskonałej). Do rozwiązania tak skonstruowanego modelu stosuje się zazwyczaj metody optymalizacyjne. Brak konieczności modelowania interakcji pomiędzy konkurentami rynkowymi sprawia, że budowa takiego modelu jest zadaniem stosunkowo prostym. Problem budowy modelu rynku energii elektrycznej komplikuje się znacznie w przypadku konkurencji niedoskonałej – oligopolu. Postępujące procesy integracyjne i konsolidacyjne w sektorze elektroenergetycznym spowodowały wykształcenie się właśnie takiej struktury rynkowej. W modelowaniu oligopolu koniecznym jest rozwiązanie zadania optymalizacyjnego (najczęściej maksymalizacja zysku) dla wszystkich graczy rynkowych równocześnie. W praktyce przyjmuje się jeden z następujących modeli: *Leader-in-Price*, Cournot, Bertrand, Stackelberg lub *Supply Function Equilibrium (SFE)* [4, 5, 12].

6. Kalibracja modelu – polega na zbadaniu czy model właściwie symuluje działanie danego systemu w czasie, dla którego możliwa jest weryfikacja z danymi historycznymi. Etap ten jest zazwyczaj bardzo czasochłonny i wymaga przeprowadzenia dużej liczby obliczeń testowych.
7. Analiza wrażliwości (czułości) modelu – etap, którego głównym celem jest sprawdzenie, czy skonstruowany model właściwie odpowiada na zadane wymuszenia. Zazwyczaj badany jest wpływ zmiany kluczowych danych (np. zdeterminowany popyt na energię elektryczną, podaż energii pierwotnej, ceny paliw pierwotnych itp.) na najważniejsze zmienne (funkcja celu, koszty produkcji energii elektrycznej, wielkość produkcji energii z wykorzystaniem wybranych technologii, emisja zanieczyszczeń, zysk przedsiębiorstwa lub grup przedsiębiorstw). Wybrane parametry modelu zmienia się zazwyczaj w określonych granicach, a następnie bada się wyniki rozwiązanego modelu poprzez analizę wartości zmiennych. Prawidłowość konstrukcji ocenia się poprzez analizę racjonalności wyników na podstawie wartości, kierunku oraz tempa zmian. Głębszej analizie poddawane są zmiany wartości wynikowych, określające czułość systemu na zadane wymuszenia. Badanie czułości pozwala również zidentyfikować, które czynniki i z jaką intensywnością wpływają na funkcjonowanie modelowanego systemu. Wyniki badań analizy wrażliwości przedstawia się zazwyczaj w formie tabelarycznej lub jako rysunek. Przykładowe wyniki analizy wrażliwości przedstawiono na rysunku 1, który odzwierciedla różnicę w stosunku do bazowej wartości kosztów energii elektrycznej w górnictwie węgla kamiennego. W tym przypadku wyniki analizy wrażliwości modelu



Rys. 1. Przykładowe wyniki badania wrażliwości modelu, różnica w stosunku do bazowej wartości całkowitych kosztów energii elektrycznej w górnictwie węgla kamiennego [Mzł]
Źródło: Kamiński 2006

Fig. 1. An example of sensitivity analysis, the difference in relation to the base value of costs of electricity in the hard coal mining sector [Mzł]

wskazują, że jest on najbardziej czuły na zmiany ceny węgla kamiennego. Wynika to ze specyfiki krajowego sektora wytwarzania energii elektrycznej, wykorzystującego przede wszystkim ten nośnik energii pierwotnej.

W wyniku badania wrażliwości modelu konieczna może okazać się ponowna weryfikacja lub nawet zmiana modelu konceptualnego lub matematycznego.

8. Zdefiniowanie scenariuszy badawczych – etap, w którym budowane są realistyczne zestawy założeń poddawanych analizie. Ponieważ możliwe jest zbudowanie dowolnej liczby scenariuszy badawczych konieczne jest pewne ograniczenie liczby scenariuszy odzwierciedlających możliwe decyzje i konfiguracje analizowanego systemu. Definiowanie scenariuszy powinno być na bieżąco konsultowane z osobami podejmującymi decyzje/zainteresowanymi wynikami badań.
9. Rozwiązanie modelu matematycznego zaimplementowanego w systemie komputerowym – etap, w którym następuje rozwiązanie zweryfikowanego, przetestowanego i skalibrowanego modelu matematycznego. Etap ten obejmuje również analizę wyników pod kątem ich racjonalności.
10. Rekomendacja decyzji – na tym etapie możliwe jest sformułowanie wniosków oraz ewentualnie propozycji decyzji. W praktyce formułowana jest pewna liczba alternatywnych propozycji wraz ze wskazaniem możliwych i prawdopodobnych ich skutków.

11. Wdrożenie decyzji – etap ten wymaga dużej ostrożności, często poprzedzony jest projektem pilotażowym, w ramach którego przetestować można, czy wstępne efekty zgodne są z założeniami wynikającymi z badań modelowych.
12. Ocena rzeczywistych skutków podjętej decyzji – polega na analizie ostatecznych efektów wdrożenia danej decyzji. Na tym etapie konieczna jest weryfikacja, czy proces podjęcia decyzji był właściwie zorganizowany i przeprowadzony.

Podsumowanie

Modele systemów energetycznych mają praktycznie nieograniczone możliwości zastosowań, zarówno w badaniach dotyczących tego sektora, jak i jego powiązań z gospodarką całego kraju. Ze względu na liczbę występujących interakcji oraz specyficzne cechy energii elektrycznej jako produktu, praktycznie każda decyzja gospodarcza powinna być poprzedzona wnikliwymi badaniami w zakresie ilościowych skutków podejmowanych decyzji. Działania takie, poprzedzające wdrożenie różnego rodzaju regulacji prawnych czy podjęcia decyzji inwestycyjnych, wpływają istotnie na zmniejszenie ryzyka.

Budowa modelu systemu energetycznego wymaga zastosowania odpowiedniej metodologii, która w znacznym stopniu determinuje późniejsze praktyczne zastosowanie modeli. Wskazane jest, by nie zaniedbywać żadnego z zaprezentowanych w niniejszym artykule etapów oraz konsekwentnie realizować poszczególne kroki.

Przedstawiona w artykule uproszczona procedura budowy modelu systemu energetycznego wskazuje, jak skomplikowanym i długotrwałym procesem jest budowa takiego modelu. W praktyce oprócz interdyscyplinarnej wiedzy niezbędnej w tego typu pracach, istotne znaczenie ma również doświadczenie zespołu badawczego uzyskane w trakcie wieloletniej pracy.

Literatura

- [1] INTRILIGATOR M. D., 1978 – *Econometric models, techniques and applications*. Prentice-Hall, New Jersey.
- [2] KAMIŃSKI J., 2006 – *Wpływ liberalizacji rynku energii elektrycznej na górnictwo węgla kamiennego*. IGSMiE, Kraków.
- [3] KAMIŃSKI J., 2010a – *Zastosowanie modeli rynków energii elektrycznej*. Elektroenergetyka, czerwiec 2010, SEP COSiW, Warszawa.
- [4] KAMIŃSKI J., 2010b – *Metody modelowania równowagi rynków energii elektrycznej*. Rynek Energii 3 (88), Kaprint, Lublin.
- [5] LINEARES P., SANTOS F.J., VENTOSA M., LAPIEDRA L., 2008 – *Incorporating oligopoly, CO₂ emissions trading and green certificates into a power generation expansion model*. Automatica 44, 1608–1620, Elsevier Science.

- [6] MŁYNARSKI S., SZUMILAK J., BAŚCIK K., KOCZYŃSKI W., 1989 – Elementy teorii systemów i informacji. Akademia Ekonomiczna w Krakowie, Kraków.
- [7] MURTY K.G., 1999 – Linear Complementarity, Linear and Nonlinear Programming – Internet Edition, Linear Complementarity Problem, Its Geometry and Applications.
http://ioe.engin.umich.edu/people/fac/books/murty/linear_complementarity_webbook/
- [8] SIERKSMA G., 2002 – Linear and integer programming: the theory and practice – Second Edition. Marcel Dekker Inc., New York.
- [9] SUWAŁA W., 1995 – Badania modelowe perspektyw górnictwa i rynku węgla kamiennego. Studia, Rozprawy, Monografie nr 38, CPPGSMiE PAN, Kraków.
- [10] SUWAŁA W., KAMIŃSKI J., KUDEŁKO M., 2003 – Modelowanie restrukturyzacji górnictwa węgla kamiennego. Polityka Energetyczna t. 6, z. spec., Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- [11] SUWAŁA W., LABYS W.C., 1998 – Modeling transition in the Polish coal industry. IGSMiE PAN, Kraków.
- [12] VENTOSA M., BAÍLLO A., RAMOS A., RIVIER M., 2005 – Electricity market modelling trends. Energy Policy 33, 897–913, Elsevier Science.

Jacek KAMIŃSKI

Modeling of energy systems: general methodology of a model development

Abstract

The paper presents a general methodology of the energy sector model development. The key role of modeling in the process of decision making concerning the fuel and energy sectors was emphasized. A 12-stage step-by-step procedure of model development was presented, with a special attention brought to typical problems that arise while building such a model. The paper ends with some conclusions including key messages based on analysis carried out in this article.

KEY WORDS: modeling, methodology of a model development, energy sector