

Mariusz KUDEŁKO*

Znaczenie analizy systemowej w prognozowaniu rozwoju sektorów paliwowo-energetycznych

STRESZCZENIE. Tematem artykułu jest wykorzystanie analizy systemowej w modelowaniu procesów gospodarczych zachodzących w gospodarce paliwowo-energetycznej. Określono zadania i etapy analizy systemowej oraz scharakteryzowano typy modeli wykorzystywanych do prognozowania rozwoju systemów paliwowo-energetycznych. Omówiono cele i zadania modeli matematycznych opracowanych w Pracowni Polityki Energetycznej i Ekologicznej IGSMiE PAN.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza systemowa, modelowanie matematyczne, sektor paliwowo-energetyczny

Wprowadzenie

Funkcjonowanie systemów paliwowo-energetycznych cechuje skomplikowany charakter zależności występujących pomiędzy ich poszczególnymi elementami składowymi. Relacje te stanowią także główną przesłankę prowadzenia badań nad prognozowaniem rozwoju systemów paliwowo-energetycznych. Modele matematyczne, podstawowe narzędzia analityczne służące do prognozowania i optymalizacji gospodarki paliwami i energią, wykorzystują dorobek naukowy z zakresu badań systemowych. Początkowo były to modele

* Dr inż. — Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi PAN, Kraków; e-mail: kudelko@min-pan.krakow.pl

Recenzent: prof. dr hab. inż. Eugeniusz MOKRZYCKI

rozwiązujące problemy pozyskania paliw pierwotnych, a ich zasadniczym celem był wybór najtańszych źródeł dostaw paliw. Wraz z rozwojem technik obliczeniowych intensywnie rozwijał się kierunek badań nad optymalizacją rozwoju krajowych sektorów paliwowo-energetycznych, a zastosowanie modeli komputerowych pozwoliło na opracowanie ich najkorzystniejszych strategii.

Główny kierunek obecnie prowadzonych badań koncentruje się na skutecznym i efektywnym rozwiązywaniu najważniejszych problemów środowiskowych, związanych z funkcjonowaniem systemów paliwowo-energetycznych. Badania prowadzone są zarówno w skali krajowej, jak i globalnej, a podstawowym ich celem jest zrównoważony rozwój tych systemów. Należy przez to rozumieć wybór optymalnej ścieżki (harmonogramu) rozwoju energetyki, dokonywany w oparciu o analizę kosztów i korzyści proponowanych rozwiązań systemowych. Jednym z kierunków, do których zmierzają te rozwiązania jest tzw. internalizacja kosztów zewnętrznych. Pod tym pojęciem kryje się cały szereg problemów związanych np. z eliminacją (lub ograniczeniem) globalnego efektu cieplarnianego, powstawania kwaśnych deszczy, ograniczenia składowania odpadów itp. Wpływ instrumentów ekonomicznych, czyli narzędzi, za pomocą których ta internalizacja może być dokonywana (np. podatku węglowego, systemu handlu pozwoleniami zbywalnymi, czy dyrektyw UE) na funkcjonowanie krajowych systemów paliwowo-energetycznych oraz gospodarkę jako całość, jest przedmiotem wielu publikacji naukowych i celów prac badawczych UE. Analiza systemowa, wraz z intensywnie rozwijanym aparatem naukowym w postaci różnorodnych modeli matematycznych, pozwala na rzetelną i obiektywną ocenę dostępnych rozwiązań oraz wybór najkorzystniejszych z nich.

Wykorzystanie modelowania matematycznego w programowaniu rozwoju systemów paliwowo-energetycznych ma jednak istotne ograniczenia. Do tej pory krajowe systemy energetyczne były w dużym stopniu scentralizowane i kontrolowane przez rząd, a zadaniem właściciela był nadzór nad ich prawidłowym funkcjonowaniem. Rząd, jako centralny planista, mógł zatem wykorzystywać stworzone narzędzia do realizacji swoich zadań planistycznych. Zmiany zachodzące w nowoczesnych gospodarkach, w tym postępujące procesy prywatyzacyjne, określają nowe warunki funkcjonowania przedsiębiorstw energetycznych, w tym także tworzą presję konkurencyjną na rynku producentów energii. Zatem rola państwa jako właściciela maleje, co powoduje, iż wykorzystanie modeli matematycznych do planowania rozwoju systemów energetycznych jest do pewnego stopnia ograniczone. Zadaniem narzędzi planistycznych jest przede wszystkim określanie przewidywanych kierunków rozwoju tych systemów oraz analizowanie wpływu regulacji prawnych na ich konkurencyjność oraz funkcjonowanie całości gospodarki. Wiedza, jaką dostarczają tego typu analizy, może być podstawą do ustalania i weryfikacji celów polityk krajowych (np. polityki energetycznej i polityki ekologicznej państwa), polityk sektorowych (np. program rozwoju energii odnawialnej), a także działań podejmowanych w skali międzynarodowej (np. unijny program handlu pozwoleniami CO₂).

Poważne przeszkody w szerszym niż dotychczas wykorzystaniu modelowania matematycznego wynikają także z ograniczeń metodologicznych. Skomplikowany charakter relacji zachodzących w systemach energetycznych i ich wielowymiarowy wpływ na gospodarkę powoduje, że ich prawidłowe i pełne odwzorowanie napotyka na duże trudności.

Stąd niezbędne jest zastosowanie pewnych zabiegów upraszczających, które z natury rzeczy zniekształcają istniejący system wzajemnych relacji techniczno-ekonomicznych. Ponadto, w wielu wypadkach zgromadzony materiał statystyczny jest niewystarczający, a jego wiarygodność ograniczona, co powoduje, że jakość otrzymanych wyników badań modelowych jest niekiedy wątpliwa.

Nakreślona problematyka badawcza z zakresu analizy systemowej została w artykule ujęta zarówno pod względem teorii, jak i praktyki. Przedmiotem artykułu jest określenie znaczenia analizy systemowej w modelowaniu procesów gospodarczych zachodzących w gospodarce paliwowo-energetycznej. Celem artykułu jest charakterystyka metodyki badawczej — analizy systemowej — wykorzystywanej w modelowaniu procesów gospodarczych oraz opis typów, struktur i zadań modeli matematycznych, służących do wspomagania podejmowania decyzji w planowaniu rozwoju systemów paliwowo-energetycznych. W artykule przedstawiono również najważniejsze cele i zadania modeli matematycznych opracowanych w trakcie kilkunastoletnich badań prowadzonych w IGSMiE PAN w Krakowie.

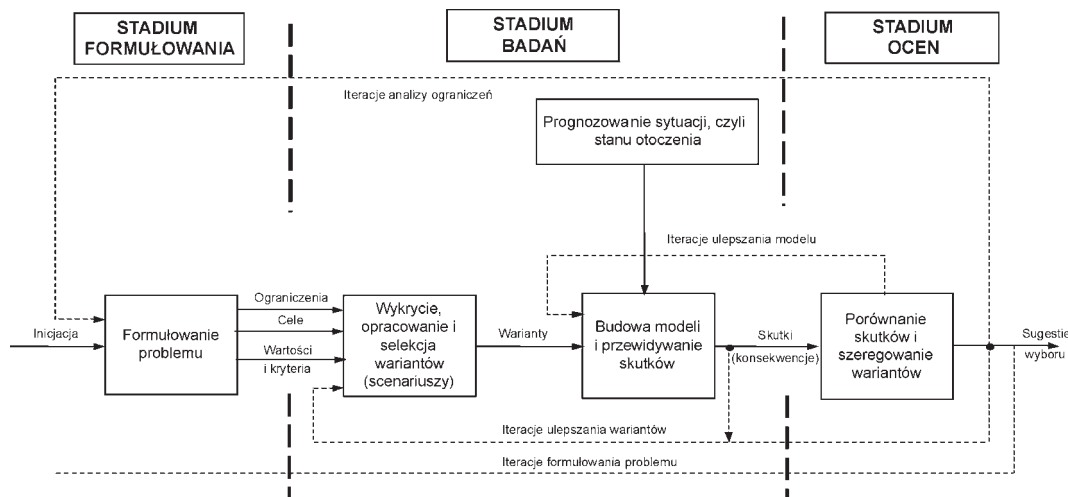
Podstawy analizy systemowej

W analizie systemowej dąży się do opisywania rzeczywistości w kategoriach systemów, ich części składowych oraz powiązań, zarówno pomiędzy częściami składowymi systemu, jak i między różnymi systemami (Jankowski 1997). Podejście systemowe zakłada, że badana rzeczywistość jest zbyt złożona, by można było ją w pełni poznać, czyli zrozumieć i opisać wszystkie jej części i zależności zachodzące między nimi. Postuluje więc zastąpienie badanego, złożonego obiektu jego modelem, w którym odwzorowuje się jedynie najważniejsze, zagregowane części i zależności, ale w taki sposób, aby zachowanie modelu odpowiadało w przybliżeniu zachowaniu się jego pierwowzoru. Pozwala to na zastąpienie badania rzeczywistych obiektów i procesów badaniem zachowania modelu i formułowanie na tej podstawie wniosków, zachowujących swą ważność także w odniesieniu do badanego fragmentu rzeczywistości (Jankowski 1997).

W świetle podanej definicji najważniejsze cechy analizy systemowej to:

- ✧ identyfikacja poszczególnych elementów jako składowych systemu,
- ✧ rozwój elementu nie jest samoistny i obiektywnie zdeterminowany, lecz jest zależny od zachowań pozostałych elementów systemu i impulsów płynących z otoczenia,
- ✧ przekształcenia systemu dokonują się pod wpływem zmieniających się uwarunkowań zewnętrznych oraz zmienności zachowania jego elementów.

Podstawowym zadaniem analizy systemowej jest opisanie i wyjaśnianie relacji zachodzących w systemie oraz określenie zakresu jego zmian. Pozwala to na dostosowanie się systemu do zmienionych uwarunkowań oraz skierowanie jego rozwoju w pożądanym kierunku. Poniżej przedstawiono schemat procedury analizy systemowej, w tym najważniejsze etapy i relacje między nimi (rys. 1).



Rys. 1. Procedura analizy systemowej
Źródło: Findeisen, Quade 1996

Fig. 1. The system analysis procedure

W pierwszym etapie badań następuje sformułowanie problemu decyzyjnego, w tym określenie celu (lub celów) badania, czasu i stopnia szczegółowości, badanych wartości (zmiennych decyzyjnych), wartości i kryteriów, na podstawie których te cele będą realizowane. Na etapie badań następuje wykrycie, opracowanie i selekcja wariantów obliczeniowych, budowa modelu oraz przeprowadzenie obliczeń. Budowa modelu wymaga sformułowania matematycznego opisu systemu oraz opracowanie (lub wykorzystanie) oprogramowania do jego rozwiązania¹. Model matematyczny, wraz z zestawem danych wejściowych, jest następnie testowany pod względem poprawności strukturalnej. Na etapie ocen, na podstawie analizy i interpretacji wyników badań, następuje porównanie skutków i szeregowanie wariantów obliczeniowych, co stanowi podstawę dla sformułowania wniosków końcowych i rekomendacji dla decydentów — inicjatorów badania. Bardzo istotnym elementem procedury analizy systemowej jest jej weryfikacja. Dokonuje się jej zarówno na etapie formułowania problemu, gdzie zmianom mogą podlegać przyjęte cele, ograniczenia czy nawet kryteria ocen, jak i na etapie badań, np. w zakresie weryfikacji wariantów obliczeniowych oraz samej oceny poprawności modelu, tj. jego struktury i przyjętych relacji.

Przedstawiony schemat procedury analizy systemowej jest wykorzystywany w badaniach z zakresu prognozowania rozwoju krajowego sektora paliwowo-energetycznego.

¹ W badaniach prowadzonych przez IGSMiE PAN wykorzystuje się oprogramowanie GAMS — *General Algebraic Modelling System* (Brook i in. 1992). Pozwala on na łatwą konstrukcję równań modelu, obliczeń i opracowanie wyników. Dysponuje kilkoma programami (*solverami*) do wykonywania obliczeń optymalizacyjnych — od programowania liniowego i nieliniowego do programowania mieszanego nieliniowego ze zmiennymi całkowitoliczbowymi. Sposób formułowania obliczeń i równań jest podobny do zapisu matematycznego, stąd przebieg obliczeń i formuły równań są dość czytelne.

W tym przypadku inicjatorami badań mogą być Ministerstwo Gospodarki (MG), Ministerstwo Środowiska (MŚ), wyspecjalizowane agencje realizujące zadania związane z funkcjonowaniem sektora paliwowo-energetycznego (PSE, ARE), grupy ekspertów, czy stowarzyszenia producentów paliw i energii. Formułowane przez te instytucje problemy decyzyjne są różnorodne, przy czym zależą od zakresu ich zadań. Przykładowo, dla MG może to być restrukturyzacja sektora węglowego lub opracowanie polityki energetycznej kraju, dla PSE — optymalizacja rozwoju krajowego podsektora wytwarzania energii elektrycznej, dla grup producentów energii — wpływ niektórych rozwiązań prawnych na funkcjonowanie pojedynczych przedsiębiorstw oraz całą branżę. W każdym z tych przypadków — z uwagi na skomplikowany układ zależności występujących w obrębie analizowanego systemu i ich oddziaływanie na resztę gospodarki — powinna być zastosowana procedura analizy systemowej. Przykładowo, gdy przedmiotem badań jest długoterminowa prognoza rozwoju krajowego sektora paliwowo-energetycznego, wówczas główne cele badawcze mogą być formułowane jako:

- ✧ zapewnienie równowagi rynkowej w zakresie dostaw i popytu na paliwa,
- ✧ zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego,
- ✧ minimalizacja kosztów dostaw paliw i produkcji energii,
- ✧ utrzymanie właściwego stanu środowiska przyrodniczego.

Każdy z tych celów może być formułowany i realizowany niezależnie, jednak w praktyce występują one jako zbiór zadań wymagających jednoczesnej realizacji. Podobnie jest w przypadku kryteriów decyzyjnych, które mogą przyjmować różną formę. Może to być minimalizacja kosztów funkcjonowania systemu, maksymalizacja korzyści ekonomicznych (prywatnych — tj. zysków, oraz społecznych — np. w postaci nadwyżek konsumentów i producentów czy PKB), jak i minimalizacja oddziaływania na środowisko przyrodnicze. W skrajnym przypadku można także formułować zadanie jako układ zależności techniczno-ekonomicznych — bez ściśle zdefiniowanego kryterium optymalizacji.

Rozwój badanego systemu dokonuje się zawsze w warunkach istnienia pewnych ograniczeń, które należy precyzyjnie zdefiniować i uwzględnić w modelu. W przypadku sektora paliwowo-energetycznego do najważniejszych należy zaliczyć ograniczenia zasobowe paliw energetycznych, zdolności importowych, mocy produkcyjnych przedsiębiorstw, ograniczenia środowiskowe (np. w postaci limitów emisji), uwarunkowania lokalizacyjne, ekonomiczne, finansowe, społeczne itp.

Ze względu na zakres i cel podejmowanych decyzji stosowany jest różnorodny aparat badawczy w postaci odpowiedniego modelu matematycznego. W badaniach nad rozwojem systemów paliwowo-energetycznych wykorzystuje się zarówno modele sektorowe (branżowe), jak i modele z rozbudowaną strukturą zależności ekonomicznych. Ich wynikiem jest zestaw proponowanych działań i sugestii dotyczących różnych aspektów planowania gospodarczego. Gdy przedmiotem badań jest rozwój krajowego sektora paliwowo-energetycznego, zalecane działania mogą się koncentrować np. na wypracowaniu podstaw rozwojowych dla krajowego górnictwa węglowego czy energetyki. W przypadku górnictwa węglowego istotny jest plan i zakres restrukturyzacji tej branży, czyli ekonomicznie uzasadniony wybór przedsiębiorstw, które ze względu na posiadaną bazę zasobową, koszty produkcji

i jakość węgla mają szansę na rozwój i utrzymanie się na rynku energii. W odniesieniu do krajowej energetyki — w świetle sformułowanych wcześniej celów — najważniejsze działania powinny obejmować: dywersyfikację źródeł dostaw paliw, prywatyzację sektora, liberalizację rynku energii oraz implementację przepisów środowiskowych.

Modelowanie rozwoju systemów paliwowo-energetycznych

W pracach z zakresu modelowania rozwoju systemów paliwowo-energetycznych, oprócz typowego odwzorowania charakterystyk technicznych badanego systemu — w zależności od zakresu badawczego i celów analizy — wykorzystywana jest także wiedza z zakresu ekonomii, matematyki, ochrony środowiska itp. Ze względu na zakres badawczy modele służące do prognozowania rozwoju systemów paliwowo-energetycznych można podzielić na (Jankowski B., 1997):

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

Pierwsza grupa modeli — modele systemów energetycznych — koncentruje się na prawidłowym opisie nośników rynku energii, podmiotów działających na tym rynku oraz sposobów pozyskania, przetwarzania i użytkowania nośników energii. Modele tego typu wykorzystują podejście inżynierskie (*bottom-up*), gdzie nie ma potrzeby analizowania zachowań pozostałych rynków nie związanych z produkcją energii. W związku z tym część niezbędnych danych o popycie na pierwotne nośniki energii oraz energię finalną pochodzi z prognoz makroekonomicznych. Pominięcie pozostałych rynków produktów i usług ma tę zaletę, że pozwala na bardziej szczegółową reprezentację systemu energetycznego, przez co analiza jest dokładniejsza. W modelach systemów energetycznych paliwa konkurują ze sobą na rynku dostaw energii pierwotnej, a technologie produkcyjne w zakresie ich przetwarzania. Kryterium decyzyjne oparte jest zazwyczaj na minimalizacji zdyskontowanych kosztów zaspokojenia wielkości popytu na energię elektryczną i ciepłą. Najważniejsze zmienne modelu to: wielkość zużycia pierwotnych nośników energetycznych, wielkość produkcji energii elektrycznej i ciepła, poziom nakładów inwestycyjnych, emisja zanieczyszczeń gazowych itp.

Rozwój technik informatycznych i technologii komputerowych pozwala coraz częściej na modelowanie rozwoju sektorów energetycznych w oparciu o analizę równowagi cząstkowej, która wymaga zastosowania bardziej skomplikowanej techniki z zakresu programowania nieliniowego. Modele te, również szczegółowo odwzorowujące technologie pozyskania i przetwarzania nośników energii, umożliwiają prognozowanie rozwoju systemu energetycznego nie tyle na bazie tradycyjnie liczonych kosztów bezpośrednich, lecz w oparciu o szerszą kategorię kosztów ekonomicznych — w postaci sumy nadwyżek konsumentów i producentów. Tego rodzaju modele, w przeciwieństwie do poprzednich, umożliwiają określenie istotnych reakcji popytowych, w tym także zmian poziomu cen, do-

konujących się na rynku energii, spowodowanych m.in. zmianami strukturalnymi po stronie podażowej.

Z uwagi na stosowany aparat badawczy modele systemów energetycznych są bardzo zróżnicowane. Wyróżnia się tutaj modele symulacyjne i optymalizacyjne, statyczne i dynamiczne, liniowe i nieliniowe itp. Do najbardziej znanych modeli tego typu należą: ENPEP, MARKAL, EFOM, EFOM-ENV, MESSAGE i MIDAS². Modele te wykorzystywane były m.in. w badaniach prowadzonych przez Międzynarodową Agencję Energetyczną (IEA) oraz Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA), a także przez kraje Unii Europejskiej do wypracowywania optymalnej strategii rozwojowej krajowych systemów energetycznych.

Druga grupa modeli — modele energetyczno-ekonomiczne — wykorzystywana jest do analizy powiązań systemu energetycznego z gospodarką. Są to modele makroekonomiczne, posiadające bardziej rozbudowaną — w stosunku do poprzednich — strukturę zależności ekonomicznych. Modele te — wykorzystujące tzw. podejście *top-down* — oparte są na teorii równowagi ogólnej. Określają one stronę podażową i popytową zależnościami rynkowymi. W tym ujęciu konsumenci dążą do maksymalizacji funkcji użyteczności, a decyzje producentów wynikają z chęci maksymalizacji zysku. Dążenia te spotykają się na rynku, a ich pogodzeniem jest stan równowagi — zarówno podażowo-popytowej, jak i cenowej (Jankowski 1997). W modelach tego rodzaju właściwą miarą kosztów ekonomicznych wprowadzenia określonych rozwiązań prawnych czy ekonomicznych w gospodarce jest zmiana dobrobytu społecznego, spowodowana realokacją zasobów z produkcji dóbr i usług z jednego sektora do drugiego, a — co istotne — nie dokonująca się w ramach mechanizmu rynkowego (Hazilla, Kopp 1990). Uzasadnieniem takiej realokacji zasobów w systemie energetycznym jest np. konieczność uwzględnienia kosztów zewnętrznych w decyzjach producentów energii, np. poprzez system podatków emisyjnych. Ingerencja ta wymusza zmianę struktury wytwarzania i cen energii, przez co zmieniają się warunki funkcjonowania całego systemu energetycznego oraz dotychczasowy sposób wykorzystania czynników produkcji. Jeżeli rośnie zakres wykorzystania dostępnych czynników produkcji w systemie energetycznym, to przy założeniu stałości zasobów w gospodarce maleje ich dostępność w innych dziedzinach gospodarki. Uwzględnienie tych zmian wymaga wykorzystania skomplikowanego aparatu badawczego w postaci makroekonomicznego modelu gospodarki, posiadającego kilka zasadniczych zalet. Najważniejszą z nich jest zdolność pomiaru kosztów ekonomicznych, a nie tylko kosztów bezpośrednich. Wykorzystuje się do tego celu istniejący system cen rynkowych lub — gdy ich brak — skłonność konsumentów do zapłaty za dobra i usługi. Wymaga to znajomości krzywych popytu i podaży produktów i usług, których ceny mogą się zmieniać na skutek uwzględnienia nowych warunków cenowych. Zmiany położenia tych krzywych są następnie podstawą do określenia zmian w nadwyżkach producentów i konsumentów, będących miarą kosztów ekonomicznych. Inne podejście do szacowania kosztów ekonomicznych polega na charakterystyce preferencji gospodarstw domowych za pomocą funkcji użyteczności lub poziomu wydatków i określeniu zmian użyteczności dokonujących się na skutek zmienionych zależności cenowych i dochodowych, spowodowanych np. realizacją programów środowiskowych (Hazilla,

² Szczegółowe opisy tych modeli znajdują się m.in. w pracach: Jusko i in. (1987), Fishbone i in. (1983), Messner (1984), Capros, Mantzos (1994).

Kopp 1990). Przykładami modeli wykorzystanymi w badaniach nad sektorami energetycznymi są: GLOBAL 2100 (Manne, Richels 1990), *Carbon Rights Trading Model* (Beaver 1993), GREEN (Burniaux i in. 1992), *Dynamic General Equilibrium Model* (Jorgenson, Wilcoxon 1990), PRIMES (Rose i in. 1996). Oprócz modeli równowagi ogólnej do grupy modeli energetyczno-ekonomicznych należy zaliczyć modele typu *input-output* i modele makroekonomiczne. Te ostatnie, w porównaniu z modelami równowagi ogólnej, które są bardziej przydatne do analiz długoterminowych, preferowane są w analizach krótkoterminowych, w których mogą występować sytuacje braku równowagi w sensie teorii Walrasa.

Trzecia z prezentowanych grup modeli to zintegrowane modele energetyczno-ekonomiczno-środowiskowe. Ze względu na wielopłaszczyznowy charakter związków i konieczność bardziej szczegółowego ich określenia niż w przypadku modeli równowagi ogólnej, preferowane jest podejście polegające na łączeniu kilku wyspecjalizowanych i uzupełniających się wzajemnie modeli. 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. Pomimo niewątpliwych zalet takiego podejścia podstawowa trudność polega tu na zapewnieniu spójności wyników współpracujących ze sobą modeli. Przykładem łączenia modeli inżynierskich z modelami makroekonomicznymi jest powiązanie modelu MARKAL z modelem MACRO (Hamilton i in. 1992). Przykładem zintegrowanego modelu energetyczno-ekonomiczno-środowiskowego jest także model MERGE, opracowany do badań problemów zmian klimatycznych w skali globalnej (Manne i in. 1994). W jego skład wchodziły modele cząstkowe: GLOBAL 2100 (model równowagi ogólnej), model klimatyczny i model oceny szkód środowiskowych.

Modele matematyczne opracowane w IGSMiE PAN

Od kilkunastu lat w Pracowni Polityki Energetycznej i Ekologicznej IGSMiE PAN prowadzone są badania z zakresu zastosowania analizy systemowej w gospodarce surowcami mineralnymi, paliwami i energią. Opracowane modele stanowią samodzielne narzędzia badawcze wykorzystywane do analiz i optymalizacji rozwoju sektorów gospodarczych w Polsce, w tym przede wszystkim przemysłu węglowego. Współpracują także z innymi modelami, służącymi do planowania rozwoju krajowej elektroenergetyki. Istotnym elementem obecnych badań IGSMiE PAN są sektorowe ograniczenia środowiskowe, związane m.in. z implementacją przepisów UE do prawodawstwa krajowego. Główne zagadnienia dotyczące tego obszaru badań to: analiza możliwości dostaw węgla kamiennego o odpowiedniej jakości dla energetyki, wpływ instrumentów ekonomicznych na funkcjonowanie sektora paliwowo-energetycznego, problematyka wyceny kosztów zewnętrznych związanych z emisją zanieczyszczeń.

Do najważniejszych modeli opracowanych w IGSMiE PAN należy zaliczyć³:

- ✧ model analizy i optymalizacji funkcjonowania górnictwa i jego restrukturyzacji,
- ✧ model bilansowania dostaw węgla dla podsystemu wytwarzania energii elektrycznej,
- ✧ model zarządzania sprzedażą węgla w przedsiębiorstwie górniczym,
- ✧ model sterowania jakością produkcji w kopalni węgla brunatnego,
- ✧ model wyboru strategii dostosowawczej do wymogów środowiskowych,
- ✧ model oceny funkcjonowania instrumentów ekonomicznych w elektroenergetyce,
- ✧ model decyzyjny przedsiębiorstwa pozyskiwania surowców skalnych,
- ✧ model rozwoju krajowego sektora energetycznego,
- ✧ model rozwoju technologii czystego węgla.

Poniżej dokonano krótkiej charakterystyki tych modeli oraz przedstawiono ich najważniejsze zadania.

Model analizy i optymalizacji funkcjonowania górnictwa i jego restrukturyzacji

Model składa się w zasadzie z dwóch współpracujących ze sobą narzędzi: modelu górnictwa węgla kamiennego oraz modelu rynku węgla. Pierwszy z nich jest modelem podaży węgla, przy czym jego najważniejszą cechą jest indywidualne rozpatrywanie poszczególnych kopalni, wraz z możliwością podjęcia decyzji o ich likwidacji, kontynuacji produkcji lub budowie nowej kopalni. Takie podejście czyni analizę bliższą rzeczywistości, co ma szczególne znaczenie w przypadku górnictwa, gdzie warunki geologiczno-górniczne decydują o parametrach technologicznych i ekonomicznych kopalń. Wynikiem obliczeń modelowych są zestawy informacji charakteryzujących stan górnictwa węglowego, a do najważniejszych jego zadań należy zaliczyć:

- ✧ ocenę efektywności funkcjonowania sektora górnictwa węglowego,
- ✧ określenie skutków likwidacji kopalń oraz wybór optymalnych wariantów ich rozwoju,
- ✧ określenie optymalnej struktury produkcji węgla kamiennego,
- ✧ ocenę efektywności importu i eksportu węgla,
- ✧ ocenę programów socjalnych w górnictwie.

Zadaniem drugiego z modeli — modelu rynku węgla — jest analiza podaży węgla z punktu widzenia wydzielonych pod względem przestrzennym i rodzajowym grup popytowych na węgiel. Model uwzględnia dziesięć regionów popytu, a w każdym z nich cztery grupy odbiorców: elektroenergetykę, koksownictwo, przemysł oraz drobnych odbiorców i gospodarstwa domowe. Każda z grup jest charakteryzowana przez liniowe krzywe popytu, oszacowane na podstawie rzeczywistych danych o zużyciu węgla oraz współczynników elastyczności cenowych.

³ Szczegółowy opis struktur, zadań i sposobów wykorzystania stworzonych modeli były przedmiotem wielu publikacji, m.in.: Suwała 1995; Kudelko 2000, 2003, 2004; Kudelko i in. 2001; Suwała i in. 2001, 2002, 2004, 2005; Sztaba i in. 2004; Kamiński i in. 2002. Część z modeli była wykorzystana w pracach realizowanych dla PSE S.A., EC Warszawskie, KWB Konin.

Modele bazują na rzeczywistych danych dotyczących perspektyw rozwoju kopalń, co czyni z nich przydatne narzędzia eksperckie. Niestety, podejmowane próby wykorzystania stworzonych narzędzi do analiz restrukturyzacji krajowego sektora górnictwa nie zakończyły się sukcesem.

Model bilansowania dostaw węgla dla podsystemu wytwarzania energii elektrycznej

Opisany powyżej zestaw modeli znalazł zastosowanie we wspólnych pracach prowadzonych przez IGSMiE PAN i PSE S.A. Wraz z modelem IPM, wykorzystywanym przez PSE S.A. do prognozowania rozwoju podsystemu wytwarzania energii elektrycznej, stworzono system analityczny służący do określania optymalnej struktury zużycia węgla, zarówno ze względu na warunki jego pozyskania, jak i warunki jego użytkowania po stronie krajowej elektroenergetyki. Zadaniem współpracujących ze sobą modeli było uzyskanie zgodnej struktury dostaw i zapotrzebowania na węgiel kamienny, spełniającej dwa kryteria: minimalizacji kosztów pozyskania węgla oraz minimalizacji kosztów wytwarzania energii elektrycznej. Bilans zapotrzebowania energetycznego przeprowadzany jest w oparciu o szczegółowe dane o podaży kilkudziesięciu gatunków węgla kamiennego.

Zbudowany system modeli i ich wyniki były podstawą oceny możliwości ilościowo-jakościowego zabezpieczenia dostaw węgla kamiennego dla krajowego podsystemu wytwarzania energii elektrycznej — dla różnych wariantów rozwojowych i wymagań emisyjnych.

Model zarządzania sprzedażą węgla w przedsiębiorstwie górnictwa

Model umożliwia planowanie wielkości sprzedaży węgla w przedsiębiorstwie górnictwa. Do podstawowych zadań modelu należy zaliczyć:

- ✧ wybór ekonomicznie uzasadnionego poziomu sprzedaży (wybór skali produkcji),
- ✧ określenie struktury tej sprzedaży (wybór wielkości produkcji w poszczególnych kopalniach w okresach miesięcznych lub dobowych),
- ✧ analiza i eliminacja wpływu tzw. sezonowości dostaw węgla,
- ✧ określenie wpływu czynników niepewności (zmian poziomu kosztów stałych i zmiennych, zmian popytu na produkty kopalń oraz cen węgla) na wyniki ekonomiczne spółki węglowej.

Wyniki prac udowodniły, że zastosowanie procedury optymalizacyjnej, wspomagającej proces planowania produkcji, może znacząco poprawić wyniki ekonomiczne przedsiębiorstwa górnictwa. Jednak próby praktycznego wykorzystania tego narzędzia w zarządzaniu sprzedażą węgla nie zakończyły się, jak dotąd, sukcesem.

Model sterowania jakością produkcji w kopalni węgla brunatnego

Impulsem do stworzenia tego narzędzia była potrzeba określenia optymalnego harmonogramu wydobycia węgla w KWB Konin. Problematyka sterowania produkcją ma dla tej kopalni szczególne znaczenie, wynikające z konieczności dotrzymania warunków jakościowych produkowanych węgla. Dostawy węgla o odpowiednich charakterystykach jakościowych muszą bowiem spełniać wymagania stawiane przez głównych odbiorców węgla brunatnego, jakimi są elektrownie Pątnów i Konin. Kopalnia dysponuje węglem niejednorodnym pod względem jakości (duża zmienność wartości opałowej i zawartości siarki), natomiast odbiorcy wymagają stabilnych dostaw, które spełniają surowe normy emisyjne.

W celu rozwiązania tego problemu zaproponowano stworzenie systemu planowania produkcji, zarówno w horyzoncie długoterminowym (kilkunastoletnim), jak i dobowym. Zadaniem modelu planowania długoterminowego było określenie wielkości wydobycia z poszczególnych bloków zasobowych, zlokalizowanych w istniejących i planowanych odkrywkach, dla kolejnych lat funkcjonowania kopalni — zgodnie z ilościowymi i jakościowymi wymaganiami odbiorców. Do podstawowych zadań modelu planowania dobowego należało ustalenie dziennych wielkości załadunku węgla z poszczególnych zabierek do urządzeń transportowych. Wielkości te były ustalane dla ograniczeń wynikających z jakości węgla w złożach, wydajności koparek, wymagań odbiorcy co do ilości i jakości węgla i charakterystyki pracy urządzeń transportowych.

W wyniku prowadzonych prac udało się zrealizować jedynie część programistyczną. Jego implementacja w zakładzie wymagała uszczegółowienia celów planistycznych, przeprowadzenia dalszych prac koncepcyjnych oraz określenia zasad współpracy modelu z istniejącymi na kopalni narzędziami planistycznymi.

Model wyboru strategii dostosowawczej do wymogów środowiskowych

Model opracowano na zlecenie EC Warszawskie, a jego głównym zadaniem był wybór optymalnej strategii dostosowawczej elektrowni do nowych przepisów emisyjnych. Istotą przeprowadzonych badań była odpowiedź na pytanie, czy i jak przedsiębiorstwo jest w stanie sprostać dodatkowym wymaganiom w zakresie emisji zanieczyszczeń, zawartym w dyrektywach UE. Rozważane strategie dostosowawcze to stosunkowo najtańszy dobór niskoemisyjnych typów węgla oraz ewentualna budowa instalacji odsiarczania spalin. Zastosowanie określonego rozwiązania analizowane było przede wszystkim pod kątem wykorzystania pierwszej opcji, czyli dostarczenia węgla o odpowiednich parametrach jakościowych.

Wyniki pracy udowodniły skuteczność i efektywność modelowego podejścia do rozwiązywania problemów produkcyjnych zakładu energetycznego. Dysponując szczegółowymi danymi o dostępności i popycie na węgle niskosiarkowe możliwe było określenie, czy i w jaki sposób przedsiębiorstwo może spełnić przyszłe wymagania emisyjne, bez konieczności budowy kosztownych instalacji odsiarczania spalin.

Model oceny funkcjonowania instrumentów ekonomicznych w elektroenergetyce

Model ten był jedną z pierwszych prób oceny skutków wprowadzenia w krajowej elektroenergetyce systemu handlu pozwoleniami zbywalnymi. Głównym jego zadaniem była ocena kosztów dostosowawczych krajowej elektroenergetyki do zobowiązań środowiskowych, tj. globalnych limitów emisyjnych zawartych w II Protokole Siarkowym. Model umożliwiał określenie efektywności ekonomicznej systemu handlu pozwoleniami zbywalnymi na emisję SO₂, czyli potencjalnej redukcji kosztów w porównaniu z tradycyjnymi instrumentami, takimi jak np. system norm emisyjnych. Jego istotną zaletą był wysoki stopień szczegółowości — model rozpatrywał potencjalne opcje dostosowawcze, takie jak budowa instalacji odsiarczania oraz dobór węgla niskosiarkowych dla indywidualnych elektrowni — w oparciu o szczegółowe zestawy danych produkcyjnych poszczególnych kopalń węgla kamiennego oraz źródeł importowych.

Pomimo podejmowanych prób wykorzystania wyników badań (m.in. przez Ministerstwo Środowiska, które prowadziło wówczas prace koncepcyjne nad stworzeniem zasad organizacyjnych systemu handlu pozwoleniami zbywalnymi), nie udało się sfinansować dalszych prac koncepcyjnych i implementacji modelu.

Model decyzyjny przedsiębiorstwa pozyskiwania surowców skalnych

Stworzony model umożliwia podejmowanie decyzji produkcyjnych i inwestycyjnych przez przedsiębiorstwo produkujące surowce skalne w oparciu o mikroekonomiczną kategorię efektywności alokacyjnej. Termin ten rozumiany jest zarówno w wąskim ujęciu maksymalizacji prywatnych korzyści (zysków) prowadzenia działalności gospodarczej, a także w szerszym aspekcie maksymalizacji korzyści społecznych, uwzględniających negatywny wpływ eksploatacji na środowisko przyrodnicze. W celu realizacji tego zadania skonstruowano model optymalizacyjny, który opisuje rzeczywiste warunki produkcyjne i środowiskowe badanego zakładu. Określony zbiór opcji produkcyjnych, scharakteryzowany pod względem nakładów inwestycyjnych oraz stopnia oddziaływania na środowisko, stanowił punkt wyjścia dla zastosowanej procedury optymalizacyjnej. Za pomocą modelu oraz na podstawie własnego szacunku kosztów zewnętrznych, powodowanych przez poszczególne rodzaje oddziaływań środowiskowych, przeprowadzono odpowiednie obliczenia i analizę wyników.

Model rozwoju krajowego sektora energetycznego

Zadaniem modelu jest długoterminowe planowanie rozwoju krajowego sektora energetycznego, realizowane w oparciu o odmiennie od dotychczasowych prac kryterium decyzyjne, uwzględniające niekorzystne efekty zewnętrzne powodowane emisją zanieczyszczeń gazowych. Jest to model równowagi cząstkowej, gdzie istotnymi parametrami

równowagi rynkowej są zmienne ceny i poziom popytu na energię elektryczną i ciepło. W modelu najważniejsze relacje obejmują stronę podażową i popytową krajowego systemu energetycznego. Strona podażowa określa pozyskanie paliw (z kraju lub importu) i ich przetwarzanie w energię użyteczną za pomocą różnorodnych technologii energetycznych. Wybory decyzyjne podejmowane po stronie przetwarzania energetycznego paliw dotyczą wielkości produkcji i importu energii elektrycznej i ciepła oraz poziomu inwestycji technologicznych i ochronnych w wyodrębnionych technologiach. Technologie energetycznego spalania paliw przypisano do istniejących, modernizowanych i nowych elektrowni i elektrociepłowni zawodowych, elektrociepłowni przemysłowych oraz ciepłowni zawodowych, przemysłowych i komunalnych. Strona popytowa obejmuje wykorzystanie energii elektrycznej i ciepła przez głównych odbiorców, czyli sektory gospodarki: przemysł i budownictwo, transport, rolnictwo, handel i usługi, odbiorcy indywidualni oraz eksport. W zależności od wariantu, popyt jest zdeterminowany poprzez prognozę zapotrzebowania na wyróżnione nośniki energii lub przeciwnie — zadaniem modelu jest wyznaczenie optymalnej wielkości zapotrzebowania na energię. W tym drugim ujęciu decyzje podejmowane po stronie podażowej i popytowej określają warunki przesądzające o wysokości cen energii elektrycznej i ciepła w poszczególnych sektorach gospodarki. W obliczeniach zastosowano dwa kryteria decyzyjne. Pierwsze kryterium zakłada osiągnięcie tzw. efektywności kosztowej, drugie oparte jest na maksymalizacji dobrobytu społecznego, definiowanego jako suma nadwyżki konsumentów i producentów, pomniejszonego o koszty zewnętrzne powodowane emisją zanieczyszczeń gazowych.

Model jest obecnie modyfikowany w celu bardziej szczegółowego odzwierciedlenia możliwości podaży paliw, w tym poszczególnych typów węgla kamiennych, zwiększenia ilości rozważanych technologii energetycznych i opcji modernizacyjnych (głównie technologii czystego węgla), jak również bardziej szczegółowego odwzorowania obiektów energetycznego spalania paliw (np. poszczególnych kotłów energetycznych).

Model rozwoju technologii czystego węgla

Na bazie opisanego powyżej modelu powstała wersja przystosowana do szczegółowej analizy możliwości wykorzystania w krajowej energetyce tzw. technologii czystego węgla. W jednym zadaniu obliczeniowym, dla narzuconych ograniczeń podażowych i popytowych, technologicznych oraz emisyjnych, w oparciu o klasyczne kryterium optymalizacji oparte na minimalizacji kosztów, analizowane były różnorodne technologie energetycznego spalania paliw. W modelu istotną rolę odgrywają możliwości podaży węgla kamiennego, określone na podstawie ich charakterystyk ilościowo-jakościowych, uzupełnione o wykorzystanie technologii wzbogacania węgla. Potencjał wykorzystania technologii czystego węgla — w porównaniu z konkurencyjnymi technologiami wykorzystującymi gaz, energię odnawialną i jądrową — określono dla ekologicznych, finansowych i prawnych scenariuszy rozwoju. Model wykorzystano w projekcie UE pod nazwą CFF OPET, którego zadaniem było określenie możliwości rozwoju technologii czystego węgla w Polsce.

Podsumowanie

Analiza systemowa wykorzystywana jest od wielu już lat przez krajowe i zagraniczne zespoły badawcze w prognozowaniu zjawisk gospodarczych. Modelowanie matematyczne, oparte na zasadach analizy systemowej, jest skutecznym narzędziem umożliwiającym wyznaczanie kierunków i celów sektorowych polityk gospodarczych oraz analizę skutków wprowadzenia określonych rozwiązań prawnych, środowiskowych i finansowych. W Polsce tego rodzaju prognostyczne i analityczne prace wykonywane są m.in. przez EnergSys, PSE S.A., ARE S.A.

W artykule przedstawiono problematykę wykorzystania analizy systemowej w badaniach nad rozwojem sektorów paliwowo-energetycznych. Na tym tle omówiono modele opracowane w trakcie kilkunastoletnich prac prowadzonych w IGSMiE PAN. Modele te są ważnymi narzędziami badawczymi dla analiz i optymalizacji rozwoju krajowych sektorów gospodarczych, takich jak górnictwo węglowe czy energetyka, oraz pojedynczych przedsiębiorstw sektora paliwowo-energetycznego. Stworzone narzędzia programistyczne wykorzystują powszechnie stosowany w tego typu badaniach system programowania GAMS.

Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że ten kierunek badawczy ma poważne szanse dalszego rozwoju. Skuteczność, szybkość i obiektywizm wyników stwarzają bowiem istotne przesłanki do wykorzystania modelowania matematycznego w zarządzaniu gospodarczym. Cechy te jednak nie zawsze są wyraźnie uwydatniane, przez co podejście systemowe w wielu przypadkach nie znajduje zastosowania w praktyce. Bariery w szerszym niż dotychczas wykorzystaniu modeli matematycznych jest także pewna nieufność odnoszona do samego narzędzia programistycznego — tzw. „czarnej skrzynki”. Można ją przezwyciężyć poprzez aktywną współpracę zespołów realizujących oraz wdrażających dany projekt. Jest ona także niezbędna w celu lepszego odwzorowania wszystkich istotnych relacji zachodzących w badanym systemie, co ma swoje bezpośrednie przełożenie na wiarygodność wyników. Doświadczenia IGSMiE PAN w budowaniu i wykorzystaniu narzędzi programistycznych wskazują, że tego rodzaju współpraca jest możliwa z korzyścią dla wszystkich stron.

Literatura

- [1] BEAVER R., 1993 — Structural comparison of the models in EMF 12. *Energy Policy*, vol. 21, no. 3, Elsevier Science, Amsterdam.
- [2] BURNIAUX J. M., MARTIN J. P., NICOLETTI G., 1992 — GREEN — a multi sector, multi region dynamic general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO₂. Working Paper no. 104, OECD Department of Economics and Statistics, Paris.
- [3] FINDEISEN W., QUADE E., 1996 — Metodologia analizy systemowej [w]: Analiza systemowa — podstawy i metodologia. Praca zbiorowa pod red. W. Findeisena, PWN, Warszawa.
- [4] HAMILTON L.D., GOLDSTAIN G.A., LEE J., MANNE A.S., 1992 — MARKAL-MAKRO: An Overview. Brookhaven National Laboratory, New York.

- [5] HAZILLA M., KOPP R. J., 1990 — Social costs of environmental quality regulations: A General Equilibrium Analysis. *Journal of Political Economy*, vol. 98, no. 4, The University of Chicago Press, Chicago.
- [6] JANKOWSKI B., 1997 — Modelowanie rozwoju krajowego systemu energetycznego z uwzględnieniem wymagań stabilizacji redukcji emisji dwutlenku węgla w Polsce. IPPT PAN, Warszawa.
- [7] JORGENSON D.W., WILCOXEN P.J., 1990 — Global change, energy prices and US economic growth. Paper prepared for the Energy Price Hearing, US Department of Energy, Washington.
- [8] KAMIŃSKI J., KUDELKO M., KWIATKOWSKI M., SUWAŁA W., WAWRZYSZCZUK M., 2002 — Bilansowanie dostaw węgla dla potrzeb długoterminowego planowania rozwoju wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. *Sympozja i Konferencje nr 57*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- [9] KUDELKO M., 2000 — Model oceny funkcjonowania instrumentów zarządzania procesami redukcji emisji dwutlenku siarki w elektroenergetyce. *Studia, Rozprawy, Monografie nr 72*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- [10] KUDELKO M., 2003 — Efektywna alokacja zasobów w krajowym systemie energetycznym. *Studia, Rozprawy, Monografie nr 121*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- [11] KUDELKO M., 2004 — Proekologiczny model decyzyjny przedsiębiorstwa pozyskiwania surowców skalnych — cz. 1. *Ekonomia i Środowisko*, nr 2(26), Białystok, ss. 49–61.
- [12] KUDELKO M., SUWAŁA W., KAMIŃSKI J., 2001 — Optymalizacja sprzedaży węgla w spółce węglowej. *Przegląd Górniczy*, nr 10, ss. 26–33.
- [13] MANNE A.S., RICHEL R.G., 1990 — Global CO₂ emissions reductions — the impact of rising energy costs. *The Energy Journal*, vol. 12, IAEE Publications, Ohio.
- [14] MANNE A., MENDELSON R., RICHEL R., 1994 — MERGE — a Global Evaluation Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies. Washington.
- [15] ROSE A., BENAVIDES J., LIM D., FRIAS O., 1996 — Global warming policy, energy, and the Chinese economy. *Resource and Energy Economics*, vol. 18, no. 1, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- [16] SUWAŁA W., 1995 — Badania modelowe perspektyw górnictwa i rynku węgla kamiennego w Polsce. *Studia, Rozprawy, Monografie nr 38*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- [17] SUWAŁA W., KUDELKO M., KAMIŃSKI J., 2002 — Model zarządzania sprzedażą węgla w przedsiębiorstwie górniczym. *Sympozja i Konferencje nr 54*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- [18] SUWAŁA W., KUDELKO M., KAMIŃSKI J., 2005 — Modelling clean fossil fuels technologies deployment. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- [19] Suwała W., Kudełko M., Kamiński J., 2004 — Modelowanie rozwoju technologii czystego węgla. *Polityka Energetyczna*, t. 7, zeszyt specjalny, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- [20] SUWAŁA W., KUDELKO M., KAMIŃSKI J., 2001 — Zastosowanie modeli komputerowych w gospodarce paliwowo-energetycznej. *Konferencja Naukowa „Paliwa i energia dziś i jutro”*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- [21] SZTABA K.S., BLASCHKE W., TUMIDAJSKI T., GAWĘDA T., SUWAŁA W., KAMIŃSKI J., KUDELKO M., 2004 — Model ekologicznego i ekonomicznego prognozowania wydobywania i użytkowania czystego węgla, [w:] *Model ekologicznego i ekonomicznego prognozowania wydobywania i użytkowania węgla. Tom 1: Bazy i prognozy gospodarki surowcami mineralnymi i energetycznymi oraz strategii i kierunki rozwoju sektora paliwowo-energetycznego*. Praca zbiorowa pod redakcją J. Sablika. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice.

Mariusz KUDELKO

The role of system analysis in forecasting of energy sectors development

Abstract

The subject of the article is the use of system analysis in modelling of economic processes in energy systems. The basics of system analysis and types of computer models used in simulation of energy systems development were shown. The paper presents main tasks of computer models developed in the Division of Energy and Environmental Policy, Mineral and Energy Economy Research Institute and their application in the decision making-processes.

KEY WORDS: system analysis, mathematical modelling, energy sector