Waldemar KAMRAT

Politechnika Gdańska, Katedra Elektroenergetyki

Zastosowanie procedur modelowania ekonometrycznego w procesach programowania i oceny efektywności inwestycji w elektroenergetyce

Streszczenie. *W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia zastosowania procedur modelowania ekonometrycznego w procesach programowania oceny efektywności inwestycji w elektroenergetyce. Przedstawiono koncepcję wielowymiarowej metody oceny efektywności inwestowania w elektroenergetyce.*

Abstract. *The selected issues of econometric modeling in programming processes and investment effectiveness evaluation in power industry implementation are presented in this paper. The concept of the multivariate method of effectiveness evaluation of investing in power industry is presented.* ***(Implementation of econometric modeling procedures in programming processes and investment effectiveness evaluation in power industry).***

Słowa kluczowe: elektroenergetyka, inwestycje, efektywność inwestowania, ocena efektywności
Keywords: power industry, investment, investment effectiveness, evaluation of investment effectiveness

doi:10.12915/pe.2014.07.21

Wstęp

W procesie programowania i oceny efektywności inwestowania w elektroenergetyce zazwyczaj decydent ma do czynienia z problemem wyboru najlepszego wariantu (wariantu strategii w sensie zadania inwestycji rzeczowej jak i wyboru technologii) [8]. Jest to szczególna klasa problemów wyboru, dla której ocena jest znacznie utrudniona. Złożoność zagadnień wynika z jednej strony z różnorodnych ograniczeń technicznych, ekonomicznych i ekologicznych, a z drugiej strony – z wielu kryteriów o charakterze jakościowym, które można jedynie porządkować [11,13].

Kryteria i ograniczenia można mnożyć i komplikować. Złożoność problemu decyzyjnego polega jednakże na tym, że poszczególne projekty inwestycyjne mogą być oceniane z różnych punktów widzenia za pomocą zarówno kryteriów ilościowych, jak i jakościowych. Ostateczny wybór w opinii autora powinien mieć jednak wymiar ilościowy, co oznacza, że decydent (inwestor) ma otrzymać odpowiedź, które projekty są efektywne z punktu widzenia wielu aspektów i pożądanych atrybutów.

W ogólności w wielokryterialnych procesach decyzyjnych są stosowane różne wersje metod i procedur oceny [23]. Różnią się one między sobą takimi cechami, jak:
- przygotowanie zbiorów informacji o planowanych zadaniach inwestycyjnych,
- opracowanie i przetworzenie uzyskanego zbioru informacji,
- tworzenie, liczebność i charakterystyka wykorzystanego zbioru kryteriów,
- sposób nadawania i przyporządkowywania ważności (wag) poszczególnym kryteriom,
- stopień wykorzystania formalizmu matematycznego metod operacji przekształceń zbiorów w procesie oceny,
- sposób dokonywania ocen (cząstkowych i końcowych) wariantów inwestycyjnych,
- metody rangowania, oceniania (indywidualnego lub grupowego) wariantów inwestycyjnych.

Istnieje szereg różnorodnych metod oceny efektywności inwestowania dla potrzeb programowania rozwoju elektroenergetyki w warunkach rynkowych. W niniejszej pracy proponuje się koncepcję rozbudowy stosowanych dotychczas metod o elementy modelowania ekonometrycznego zagadnień wielokryterialnych, z którymi mamy do czynienia w trakcie programowania rozwoju elektroenergetyki. Ogólna zasada takiego podejścia polega na „dekompozycji zadań” strategii inwestycyjnych.

Istota metody i główne założenia metodyczne

W ogólności przyjmuje się, że jest wygenerowany zbiór kryteriów cząstkowych oceny strategii inwestycyjnych:

$$\boldsymbol{D} = \{d_j\}, \tag{1}$$

gdzie: d_j – oznacza j-te kryterium oceny dla j = 1, 2, ..., k; k – liczba kryteriów.

Istotną trudność może stwarzać „rozmycie" się poszczególnych kryteriów cząstkowych, jak również fakt, że nie wszystkie kryteria cząstkowe wpływają z równą siłą na wzajemną grę interesów. W celu „odstrojenia się" od tego wpływu można zastosować normowanie, które zachowuje naturalny sposób ważenia lub odpowiednie procedury ekonometryczne, takie jak: hierarchizacja, normalizacja i standaryzacja [5, 11].

W celu sprowadzenia poszczególnych kryteriów do porównywalności należy dokonać eliminacji wpływu różnorodnych charakterystyk, które mogą fałszować rzeczywisty priorytet ważności. Jest to zjawisko niekorzystne, które eliminuje się na drodze przypisania odpowiednich współczynników wagowych λ_j.

Zgodnie z założeniami agregacji ocen, zastosowanej do wyboru strategii inwestycyjnych, poszczególnym kryteriom ze zbioru $\boldsymbol{D}$ należy przypisać odrębne wagi. Nie występują one oczywiście w sposób naturalny i trzeba je przypisać na podstawie subiektywnych ocen ekspertów [5, 7, 11,13].

Istnieją także „obiektywne" metody i sposoby wyznaczania współczynników wagowych. Jednym z takich możliwych sposobów określenia wag λ_j (j = 1, 2, … , k) mogą być procedury opisane w pracy R. Ackoffa [2]. Algorytm przyporządkowania współczynników wagowych opiera się na następujących założeniach:
- każdemu kryterium d_j w zbiorze kryteriów $\boldsymbol{D}$ jest przyporządkowana nieujemna liczba λ_j, którą można interpretować jako pewną miarę wrażliwości względnej j-tego kryterium,
- jeżeli kryterium d_j jest ważniejsze niż kryterium d_s.($j \neq s$; s = 1, 2, … , k) to $\lambda_j > \lambda_s$, jeśli zaś d_j oraz d_s są równie ważne, to $\lambda_j = \lambda_s$,
- jeżeli λ_j oraz λ_s. odpowiadają odpowiednio kryterium d_j oraz d_s, to $\lambda_j + \lambda_s$ odpowiada łącznej ważności d_j oraz d_s.

Procedura Ackoffa polega na przypisaniu poszczególnym kryteriom liczb, które odpowiadają ich względnej ważności. Jeżeli są one niesprzeczne z wyrażonymi preferencjami, to procedura jest zakończona. W przeciwnym przypadku należy zmodyfikować liczby lub preferencje w taki sposób, aby się stały niesprzeczne.

Inną łatwą metodą określania współczynników wagowych λ_j jest metoda względnej wartości informacyjnej, wykorzystująca współczynnik zmienności realizacji liczbowej j-tego kryterium i-tej strategii inwestycyjnej. W takim ujęciu wagę λ_j j-tego kryterium wyznacza się następująco [11,13]:

(2) $$\lambda_j = \frac{v_j}{\sum\limits_{j=1}^{k} v_j},$$

gdzie: $$v_j = \frac{s_j}{\bar{x}_j},$$

przy czym: s_j – odchylenie standardowe j-tego kryterium obliczane z zależności:

(3) $$s_j = \left[\frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

x_{ij} – realizacja liczbowa j-tego kryterium i-tej strategii inwestycyjnej (i = 1,2, ... , t), $\bar{x}_j$ – wartości średnie j-tego kryterium obliczane z zależności:

(4) $$\bar{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} x_{ij}$$

Ponieważ $\sum\limits_{j=1}^{k} v_{ij} = 1$ oraz $\lambda_j > 0$, zatem λ_j można zinterpretować jako wagi określające wartość informacyjną cech-kryteriów [11].

Ponadto z warunku normującego wag $\sum\limits_{j=1}^{k} \lambda_j = 1$ wynika, że można je interpretować jako stopnie ważności poszczególnych kryteriów.

Istnieje szereg metod pozwalających na ustalanie ważności kryteriów. Jedną z bardziej interesujących jest metoda L. Shapleya związana z teorią gier kooperacyjnych, która polega na wyznaczaniu ważności j-tego kryterium na podstawie monotonicznej funkcji zbioru Ψ określonej na skończonym zbiorze kryteriów $\boldsymbol{D} = \{d_j\}$.

Indeks ważności $\Delta(d_j)$ Shapleya j-tego kryterium jest określony następującym wzorem [18]:

(5) $$\Lambda(d_j) = \sum_{\boldsymbol{A} \subset \boldsymbol{D} - \{d_j\}} \varphi_D(\boldsymbol{A}) \cdot [\boldsymbol{\Psi}(A \cup \{d_j\}) - \boldsymbol{\Psi}(A)]$$

gdzie: $\varphi_D(A) = \frac{(|D| - |A| - 1)!\,|A|!}{|D|!}$, $|D|$, $|A|$ – liczebności zbiorów $\boldsymbol{D}$, $\boldsymbol{A}$.

Indeksy ważności Shapleya Δ_j są nieujemne (wynika to z monotoniczności funkcji zbioru Ψ) i spełniają warunek normujący [18]:

$$\sum_{j=1}^{k} \Lambda(d_j) = 1$$

W celu ustalenia, które kryterium charakteryzuje się większą wagą od innego, mnoży się wartości indeksów Δ_j przez liczbę kryteriów k i dokonuje się wyboru takiego kryterium, którego wartość indeksu jest większa od 1. Z kolei dla określenia powiązań pomiędzy kryteriami h, j stosuje się indeksy zależności $I(d_h, d_j)$, wprowadzone przez Mirofushi [16], których wartości zawierają się w przedziale <–1, 1> lub współczynniki korelacji, opisane w powszechnie dostępnej literaturze [5, 17, 19].

Interesującą próbą formalizacji procesu ustalania wag okazuje się zastosowanie logiki zbiorów rozmytych, wprowadzonej przez L. Zadeha [21]. Przykładowo takie próby były podejmowane w pracach [1, 3, 4, 15, 22]. Zastosowanie pojęcia rozmycia powoduje wprowadzenie do rozważań teorii klas, w której obiekt (element) może mieć stopień przynależności zawarty między całkowitą przynależnością a nieprzynależnością do zbioru rozwiązań dopuszczalnych. W przypadku konkretnego kryterium przynależność zostaje zastąpiona przez jego użyteczność, wyrażoną liczbą z przedziału <0,1>. Sposób ustalenia wag poszczególnych kryteriów cząstkowych zależy od decyzji eksperta, przy czym musi być spełniony ogólny warunek, że suma współczynników wagowych daje jedynkę. Na podstawie doświadczeń zawodowych ekspert zwykle ustala zakresy zmian współczynników wagowych, kierując się zasadą, że najbardziej istotne są kryteria ekonomiczne (zakres 0,3 ÷ 0,4), techniczne (zakres 0,2 ÷ 0,4) i kryteria automatyzacji (zakres 0,1 ÷ 0,3). Pozostałe czynniki odgrywają mniej znaczącą rolę [11].

W wielokryterialnych metodach oceny kryteria cząstkowe mogą mieć charakter mierzalny lub niemierzalny [11]. Jeżeli mamy do czynienia z kryteriami o charakterze niemierzalnym (jakościowym), należy dla powyższych kryteriów określić ich ilościowe odpowiedniki. U podstaw takiego podejścia leży założenie, że różnice o charakterze jakościowym są pochodną różnic ilościowych, a więc w konsekwencji cechy jakościowe można określić za pomocą cech ilościowych.

W przypadku gdy w zbiorze $\boldsymbol{D} = \{d_j\}$ mamy pewien podzbiór kryteriów niemierzalnych, to należy je poddać operacji porządkowania, która się opiera na subiektywnych ocenach. Wynikiem takiego zabiegu będą skale porządkujące. W każdym przypadku należy skonstruować skale mierzalne dla kryteriów mierzalnych oraz skale porządkujące dla kryteriów niemierzalnych, przy czym należy mieć świadomość, że wszelkie szeregowanie i/lub uporządkowanie t elementowego zbioru wariantów przedsięwzięć $X_i \in \boldsymbol{X}$ (i = 1, 2, …, t) i przyporządkowanie im kryteriów oceny $\{d_j\}$, wektorów wag $\{w_j\}$ oraz preferencji $\{p_i\}$ jest zawsze obarczone błędem subiektywnym. Konstrukcja skal porządkujących dotyczy wyłącznie sytuacji oczywistych, przy czym istnieje możliwość sformalizowania nieprzechodniości i odwzorowywania preferencji. Jest to możliwe m.in. poprzez wprowadzenie porównania wielostopniowego, którą można wykorzystać do konstrukcji skali odwzorowywania preferencji.

W związku z powyższym, podczas obserwacji zjawiska charakteryzującego się dużą zmiennością parametrów nie jest możliwa rejestracja w pamięci decydenta dowolnej liczby parametrów. W konsekwencji prowadzi to do kategoryzacji obserwowanych zmiennych, przy czym rzadko jednak bywa (przy posługiwaniu się pamięcią własną) więcej niż 10 kategorii. Zakłada się więc, że proces oceniania (EP), z wykorzystaniem modelowania preferencji uczestników procesu oceniania, można opisać następującym zbiorem [23]:

(6) $$\{EP\} \in \{\{X, J\}, p, M_p\}$$

gdzie: J - informacja o projektowanym przedsięwzięciu inwestycyjnym podlegającym ocenie, X - projektowane przedsięwzięcie, p - reguły wyboru, M_p - ocena projektu X z wykorzystaniem modelowania preferencji p.

Postuluje się, że płaszczyzną odniesienia dla odwzorowania może być między innymi zbiór kryteriów oceny $\boldsymbol{D} = \{d_j\}$. Wówczas proces oceniania można opisać wzorem:

(7) $$\{EP\} \in \{\{X, J, D\}, p, M_p\}$$

Przyjęte postulaty i założenia pozwalają na stwierdzenie, że proces oceny jest relacją przyporządkowania (implikacji) przedmiotowi oceny $X_i \in \boldsymbol{X}$ (opisanego zbiorami informacji $\{J\}$ i kryteriów oceny $\{d_j\}$), za pomocą przyjętego sposobu modelowania preferencji oceny ($\{p_i\} \in \boldsymbol{P}$), ocen cząstkowych $M_{pij} \in \boldsymbol{M}_{pij}$ przekształconych do zbioru ocen końcowych $M_{pi} \in \boldsymbol{M}_{pi}$, zgodnie z operacją implikacji

$$\{\{X_i\} \to \{J_{ij}\} \to \{K_j\}\} \to \{P_i\} \to \{M_{pij}\} \Rightarrow \{M_{pi}\},$$

przy czym jest ona zawsze poprzedzona przyporządkowaniem wstępnym:

$$\{X_i\} \to \{\{J_{ij}\} \to \{D_j\}\} \to \{\{J'_{ij}\} \to \{K'_j\}\},$$

gdzie $\{K'_j\}$ jest zbiorem kryteriów ostatecznie przyjętych do procesu oceny $(\boldsymbol{K}_j \subset \boldsymbol{D}_j)$.

Zakłada się, że wieloetapowość i wielokryterialność, opisaną zbiorem przyjętych finalnych kryteriów $\{K'_j\}$ procesu oceny przedsięwzięć $\{X_i\}$, pod względem formalnym można zapisać w postaci ciągu przekształceń przyporządkowujących (implikujących) (gdzie „$\to$" oznacza operator implikacji, uwzględniający wieloetapowość procesu oceny):

(8) $$\{X_i\} \to \{\{J'_{ij}\} \leftrightarrow \{K'_j\}\} \to \{J_{ij}\} \to \{K_j\} \to \{M_{pij}\} \to \{M_{pi}\}$$

gdzie $j = 1, 2, \ldots, h$, $(h \le k)$.

Zakłada się także, że istnieje możliwość włączenia do procesu oceniania zbioru modeli preferencji $\{P_i\}$ (odzwierciedlającego wielopreferencyjność) z pomocą następującego ciągu przekształceń implikujących [23]:

(9) $$\begin{gathered}\{X_i\} \to \{\{J'_{ij}\} \leftrightarrow \{K'_j\}\} \to \{\{J_{ij}\} \to \{K_j\}\} \to \{\{J_{ij}\} \\ \to \{K_j\} \to \{P_i\}\} \to \{M_{pij}\} \to \{M_{pi}\}\end{gathered}$$

W rzeczywistości jest to następujący ciąg generalizujący bez procesu powtarzania, tj. iteracji:

(10) $$\begin{array}{ccccc} & \nearrow & \{J'_{ij}\} & \searrow & \\ \{X_i\} & & & & \{\{J_{ij}\} \to \{K_j\} \to \{P_i\}\} \to \{M_{pij}\} \to \{M_{pi}\} \\ & \searrow & \{K'_j\} & \nearrow & \end{array}$$

Występują tutaj jednocześnie dwa procesy generalizacji i hierarchizacji oraz strukturalizacji, a mianowicie proces [23]:

- całkowicie nieodwracalny:

(11) $$\begin{gathered}\{X_i\} \to \{\{J'_{ij}\} \to \{K'_j\}\} \to \{\{J_{ij}\} \to \{K_j\} \\ \to \{P_i\}\} \to \{M_{pij}\} \to \{M_{pi}\}\end{gathered}$$

- częściowo odwracalny:

(12) $$\begin{gathered}\{X_i\} \leftrightarrow \{\{J'_{ij}\} \leftrightarrow \{K'_j\}\} \leftrightarrow \{\{J_{ij}\} \leftrightarrow \{K_j\} \\ \leftrightarrow \{P_i\} \to \{M_{pij}\} \to \{M_{pi}\}\end{gathered}$$

W ogólności proces oceny wariantów projektowanego przedsięwzięcia $X_i \in \boldsymbol{X}_i$ składa się z etapów, jak przedstawiono na rysunku 1.

Zakłada się również, że analizę i przetworzenie zbioru informacji $\{J_{ij}\}$ oraz przekształcenie (uzyskanych na jego podstawie) zbioru ocen cząstkowych $\{M_{pij}\}$ w zbiór ocen końcowych $\{M_{pi}\}$ wariantu przedsięwzięcia $X_i \in \boldsymbol{X}_i$ prowadzi się przy następujących założeniach:

(13) $$\{J'_{ij}\} \to j \in <1, \ldots, h), \qquad h \to \min.$$

Proces oceny EP może podlegać (w zależności od potrzeb) okresowemu rozszerzeniu (redukcji) bądź weryfikacji, przy następujących założeniach:

- zbiór preferencji $\{P_i\}$ wykorzystywanych w procesie oceny danego wariantu przedsięwzięcia $X_i \in \{\boldsymbol{X}_i\}$ jest zbiorem skończonym i ograniczonym:

(13a) $$\{P_i\} \to i \in <1, \ldots, t>, \qquad t \to \min.$$

- preferencje $P_i \in \{\boldsymbol{P}_i\}$ są niezależne w stosunku do siebie,
- kryteria oceny $K_i \in \{\boldsymbol{K}_i\}$ są niezależne od siebie,
- operatory przekształcenia (agregacji) $\{O(K_a)\}$ są niezależne od siebie i różnią się założonym formalizmem matematycznym.

Ponadto zakłada się, że [23]:

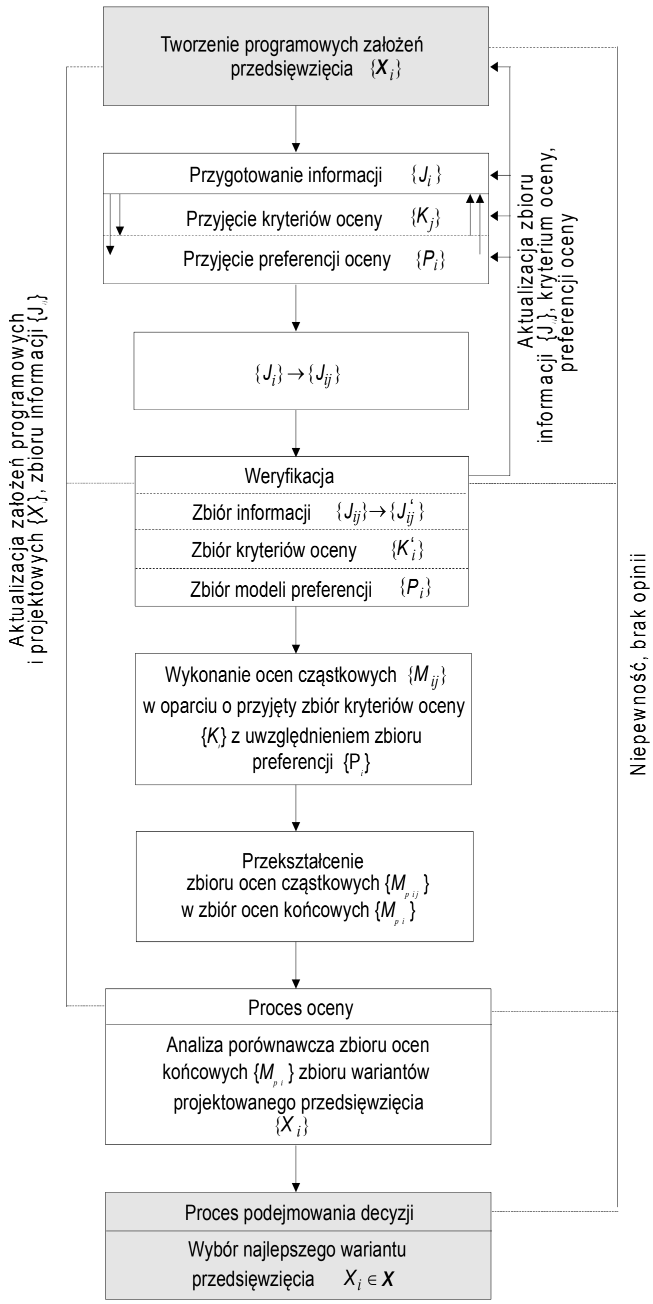
- sformalizowana procedura, skonstruowana wyłącznie za pomocą czystych metod matematycznych nie może być jedynym sposobem oceny projektowanego przedsięwzięcia $\{\boldsymbol{X}_i\}$. W związku z tym, w procesie oceny projektowanego przedsięwzięcia $X_i \in \{\boldsymbol{X}_i\}$, można wykorzystać relacyjne systemy preferencji,
- ocenę końcową $\{M_{pi}\}$ wariantów projektowanego przedsięwzięcia $X_i \in \{\boldsymbol{X}_i\}$ prowadzi się uzupełniająco za pomocą sformalizowanych jak i niesformalizowanych procedur tj. za pomocą komplementarnych wielokryterialnych macierzy porównawczych,
- ocena końcowa $\{M_{pi}\}$ danego przedsięwzięcia $X_i \in \{\boldsymbol{X}_i\}$ z wykorzystaniem zhierarchizowanego, skonkretyzowanego i zgeneralizowanego zbioru informacji $\{J'_{ij}\}$ może być zapisana za pomocą ciągu przekształceń:

(14) $$\{J'_{ij}\} \to \{K'_j\} \to \{P_i\} \Leftrightarrow \{M_{pij}\} \to \{M_{pi}\},$$

- właściwe przetworzenie oraz analiza uzyskanego zgeneralizowanego zbioru informacji $\{J_{ji}\}$ pozwala na zminimalizowanie błędu subiektywnego ΔM_{pij} przeprowadzonej oceny cząstkowej $\{M_{pi}\}$ i tym samym błędu ΔM_i oceny końcowej $\{M_{pi}\}$ przedsięwzięcia $X_i \in \{\boldsymbol{X}_i\}$:

(15) $$\begin{gathered}\Delta M_{pij} \; (i = 1, \ldots, t;\; j = 1, \ldots, h) \to \min. \\ \Delta M_{pi} \; (i = 1, \ldots, t) \to \min.\end{gathered}$$

Dla uproszczonych procedur uwzględniania preferencji kryteriów niemierzalnych przydatna wydaje się analiza regresji [19]. Cecha jakościowa ma przy tym tylko dwa warianty {0, 1} i występuje jako dyskretna zmienna zależna. Otrzymana w taki sposób charakterystyka regresji jest właśnie ilościowym odpowiednikiem kryterium jakościowego (niemierzalnego). Po przypisaniu wyróżnionym kryteriom jakościowym odpowiednich wartości {0, 1} można postępować z nimi tak, jakby to były kryteria mierzalne (ilościowe) [11,13].



Rys. 1. Schemat procesu oceny inwestycji z wykorzystaniem wieloetapowości, wielokryterialności i wielopreferencyjności wg [23]

Przykładowo dla kryteriów d_1 i d_2 mających wspólną skalę (określającą stany niezadowalający i zadowalający), można odpowiednio przypisać liczby 0, 1.

Na powyższej skali tej musi się znaleźć każdy element oceniany według kryteriów d_1 i d_2. Każdemu z kryteriów d_1 i d_2 odpowiadają zatem zbiory stanów możliwych $\overline{d}_1$ i $\overline{d}_2$.

Niech $\boldsymbol{B} = \{b_i\}$, $i = 1,2,..., t$ będzie t elementowym skończonym zbiorem, który reprezentuje możliwe projekty zadań inwestycyjnych. Zatem dla przykładowej oceny elementu $b \in \boldsymbol{B}$ za pomocą kryteriów d_1 i d_2 można powiedzieć, że elementy b_r znajdują swoje miejsce w iloczynie kartezjańskim $\overline{d}_1 \times \overline{d}_2$. Uogólniając ten przypadek dla k kryteriów można powiedzieć, że każdy element b_r znajdzie swoje miejsce w iloczynie kartezjańskim $\overline{d}_1 \times \overline{d}_2 \times ... \times \overline{d}_k$.

Odwzorowanie zbioru elementów, tj. zbioru projektów strategii inwestycyjnych w kryterium d_j (j = 1, 2, ..., k), za pomocą pewnej funkcji g_j wg formuły:

(16) $$\boldsymbol{B} \xrightarrow{g_j} \boldsymbol{d}_j$$

pozwala na określenie grafu skierowanego $\boldsymbol{G}_j$ o postaci:

(17) $$\boldsymbol{G}_j = (B, U_j) \text{ dla } j = 1,...,k,$$

przy czym:

(18) $$< b_r; b_s > \in U_j \equiv [g_j(b_r) \ge g_j(b_s)], \text{ dla } r \ne s;\ r,s = 1,2,...,t.$$

Efektem operacji odwzorowania zbioru $\boldsymbol{B}$ w kryterium d_j jest więc graf typu G_j. Każdemu zatem j-temu kryterium dla danego projektu odpowiada jeden graf skierowany G_j.

Porównanie t elementów z k punktów widzenia, tj. kryteriów oceny, równoznaczne z postawieniem danego elementu b_r w iloczynie kartezjańskim $\overline{d}_1 \times \overline{d}_2 \times ... \times \overline{d}_k$, zostało rozbite na k niezależnych odwzorowań opisanych funkcją g_j. Wszystkie elementy $b_r \in \boldsymbol{B}$ są więc porównywane i oceniane według j-tego kryterium, następnie według kryterium (j + 1), (j + 2) aż do wyczerpania liczby k kryteriów [11,13].

Ponieważ jednak dany element b_r oceniany według poszczególnych kryteriów może zajmować różne miejsca na skali, ostateczna ogólna ocena powinna być wydana na podstawie syntetycznej miary oceny dla wszystkich kryteriów.

Konstrukcję takiej miary przedstawiono w dalszej części pracy.

Miara oceny efektywności inwestowania

Ważkim zagadnieniem przy konstrukcji syntetycznej miary oceny efektywności jest wybór (na drodze analizy formalno-merytorycznej) możliwych strategii inwestycyjnych oraz określenie k-elementowego zbioru cech-kryteriów, które następnie posłużą do oceny rozważanych przedsięwzięć [11,13].

Istotną sprawą jest także określenie baz danych wejściowych w zakresie zapotrzebowania na energię, uwarunkowań realizacyjnych, zakresu i sposobu finansowania oraz planowanych inwestycji. W początkowym etapie badań tworzy się wstępną macierz obserwacji $\boldsymbol{X}^o = [x^o_{ij}]$, w której są zapisywane realizacje liczbowe x^o_{ij} strategii inwestycyjnej charakteryzującej się j-tą cechą-kryterium (o charakterze mierzalnym) oraz spełniającej warunek:

(19) $$x^o \ge 0,$$

przy czym: i = 1, 2, ..., t; j = 1, 2, ..., k.

Utworzona w ten sposób macierz $\boldsymbol{X}^o = [x^o_{ij}]$ zawiera realizacje liczbowe zmiennych ilościowych wyrażone w różnych jednostkach miar. Z powyższych względów zmienne x^o_{ij} nie spełniają postulatów formuł normalizacyjnych [5] oraz mają różnorodne preferencje odnośnie do specyfiki: stymulującej i destymulującej dla poszczególnych cech-kryteriów cząstkowych.

W kolejnym etapie badań należy zastosować techniki modelowania ekonometrycznego i dokonać normalizacji zmiennych za pomocą odpowiednich procedur obliczeniowych [5], przy czym istotnym zagadnieniem jest tutaj przekształcenie obrazów realizacji liczbowych zmiennych x_{ij} na przedział <0,1>, które jednocześnie eliminuje wpływ różnych jednostek miar. Problemem tym zajmowali się między innymi G. G. Azgladow, J. Greń, R. Kolman, E. P. Rajchman, W. J. Wesołowski [5]. Przekształcenie, które pozwala unormować (zunitaryzować) badane cechy (stymulanty ${}_Sx$, destymulanty ${}_Dx$), można opisać następującymi zależnościami [5, 19]:

$$ {}_S x'_{ij} = \frac{{}_S x_{ij} - \min\limits_i \{{}_S x_{ij}\}}{\max\limits_i \{{}_S x_{ij}\} - \min\limits_i \{{}_S x_{ij}\}}, \tag{20} $$

$$ {}_D x'_{ij} = \frac{{}_D x_{ij} - \max\limits_i \{{}_D x_{ij}\}}{\min\limits_i \{{}_D x_{ij}\} - \max\limits_i \{{}_D x_{ij}\}}. \tag{21} $$

Przekształcenie normalizacyjne w takim ujęciu ma charakter przekształcenia liniowego, co wskazywałoby na jednakowe znaczenie zmian bezwzględnych wartości cechy w całym obszarze zmienności [11,13].

W niniejszej pracy zastosowano powyższą procedurę normalizacyjną, w wyniku której utworzono unormowaną macierz $\boldsymbol{X}' = [x'_{ij}]$, natomiast w ogólnym przypadku można stosować modyfikację wzorów (20), (21) wg następujących formuł [5]:

$$ {}_S x'_{ij} = \left(\frac{{}_S x_{ij} - \min\limits_i \{{}_S x_{ij}\}}{\max\limits_i \{{}_S x_{ij}\} - \min\limits_i \{{}_S x_{ij}\}} \right)^{z_j}, \tag{22} $$

$$ {}_D x'_{ij} = \left(\frac{{}_D x_{ij} - \max\limits_i \{{}_D x_{ij}\}}{\min\limits_i \{{}_D x_{ij}\} - \max\limits_i \{{}_D x_{ij}\}} \right)^{z_j} \tag{23} $$

gdzie z_j oznacza wykładnik potęgowy, spełniający w procesie normowania specyficzną rolę. Zdaniem T. Borysa [5] wartość wykładnika wskazuje na jednakowe ($z_j = 1$) lub zróżnicowane ($z_j \neq 1$) znaczenie zmian bezwzględnych wartości cechy w całym obszarze zmienności.

Procedurom normalizacyjnym, opisanym wzorami (20, 21, 22, 23), podlegają cechy-kryteria, których realizacje liczbowe mają różne wartości dla badanych strategii inwestycyjnych. W przypadku gdy realizacje liczbowe rozważanych strategii są równe dla cechy-kryterium j ($j = 1, 2, \dots, k$), następuje naturalna eliminacja tej cechy, ponieważ wszystkie strategie są jednakowo ocenione z punktu widzenia tej cechy, a więc uzyskane cząstkowe oceny praktycznie nie wywierają wpływu na globalną ocenę [11,13].

W celu uwzględnienia w procesie oceny efektywności inwestowania także zjawisk o charakterze jakościowym (określanych cechami niemierzalnymi) należy im przypisać odpowiedniki ilościowe {0,1} zgodnie z zasadą podaną we wcześniejszym fragmencie pracy i dołączyć do unormowanej macierzy obserwacji $\boldsymbol{X}' = [x'_{ij}]$. Nowa macierz $\boldsymbol{X}'' = [x''_{ij}]$, nazwana macierzą uporządkowaną, zawiera zatem przekształcone zmienne $x''_{ij} \in <0,1>$ o charakterze mierzalnym (ilościowym) oraz zmienne o charakterze niemierzalnym (jakościowym).

Powyższa macierz $\boldsymbol{X}'' = [x''_{ij}]$ spełnia istotną rolę w badaniach efektywności inwestowania za pomocą zaproponowanej przez autora metodyki. W celu określenia miary oceny efektywności dla strategii inwestycyjnej ocenionej z punku widzenia k kryteriów tworzy się macierz oceny $\boldsymbol{M} = [m_{ij}]$ o wymiarach $t \times k$ [11,13].

Elementy m_{ij} macierzy oceny wyznacza się na drodze przypisania i-tej strategii inwestycyjnej, ocenianej na podstawie j-tego kryterium, odpowiedniej rangi punktowej, przy czym główną zasadą jest uzyskanie najwyższej liczby punktów przez strategię mającą najwyższą wartość realizacji liczbowej x''_{ij}.

W celu zapewnienia rozróżnialności rozmytych ocen poszczególnych strategii w pracy proponuje się zastosowanie procedury podziału przedziału zmienności realizacji liczbowej x''_{ij} na podprzedziały o równej rozpiętości α_ν. Tworzy się mianowicie zbiór $\boldsymbol{A} = \{\alpha_\nu\}$, gdzie ν jest liczbą sposobów podziału ($\nu = 1, 2, \dots, N$) zakresu zmienności realizacji liczbowych x_{ij} na podprzedziały o jednakowej rozpiętości α_ν określonej wzorem [11]:

$$ \alpha_\nu = 1 \cdot 10^{-\nu}. \tag{24} $$

W takim ujęciu, dla określonego ν-tego sposobu podziału na δ podprzedziałów o jednakowej rozpiętości α_ν jest możliwe rozróżnienie poszczególnych strategii wyrażonych realizacjami liczbowymi na poziomie dokładności α_ν:

$$ \underset{x''_{ij} \in \left((\delta-1)\frac{1}{\alpha_\nu},\, \delta\frac{1}{\alpha_\nu} \right)}{\forall} m_{ij}^{(\alpha_\nu)} = \delta - 1 \quad \text{gdzie} \;\; \delta = 1, 2, \dots, \frac{1}{\alpha_\nu}, \tag{25} $$

$$ \underset{x''_{ij} = 0}{\forall} m_{ij}^{(\alpha_\nu)} = 0 \tag{26} $$

Z wzorów tych wynika, że strategie (zadania) inwestycyjne, których realizacje liczbowe zawierają się w tych samych podprzedziałach, otrzymują rangę punktową ($\delta - 1$), zaś strategie, których realizacje $x''_{ij} = 0$, otrzymują rangę punktową 0.

Istotnym zagadnieniem jest sprawdzenie, czy strategie o różnych numerach i, i' ($i' \neq i$, $i = 1, 2, \dots, t$), uzyskujące rangi punktowe różniące się o 1, są jednoznacznie rozróżnialne na poziomie α_ν za pomocą następującej procedury:

$$ \underset{j=1,2,\dots k}{\forall} \left| m_{i'j} - m_{ij} \right| = 1 \cap \left| m_{i'j}'' - m_{ij}'' \right| < \alpha_\nu \tag{27} $$

Spełnienie zależności (27) oznacza, że należy przejść do następnego sposobu podziału, tj. liczbie ν nadać wartość $\nu = \nu + 1$.

W celu wyznaczenia wszystkich elementów m_{ij} macierzy oceny $\boldsymbol{M}$ należy powyższe procedury zastosować iteracyjnie dla j kryteriów cząstkowych ($j = 1, 2, \dots, k$), przy czym może się zdarzyć, że poszczególne strategie dla różnych kryteriów będą oceniane na różnym poziomie rozróżnialności α_ν.

Należy zatem dokonać sprowadzenia wartości elementów ($m_{ij}^{(\alpha_\nu)}$, ocenianych na poziomie rozróżnialności α_ν, do jednego poziomu bazy odniesienia α_b wg następującego wzoru [11, 12, 13]:

$$ m_{ij}^{(\alpha_b)} = \frac{\left(\frac{1}{\alpha_b} - 1 \right)}{\left(\frac{1}{\alpha_\nu} - 1 \right)} \cdot m_{ij}^{(\alpha_\nu)}, \tag{28} $$

gdzie: $m_{ij}^{(\alpha_b)}$ – elementy macierzy oceny sprowadzone do poziomu bazy odniesienia α_b, $m_{ij}^{(\alpha_\nu)}$ – elementy macierzy oceny wg poziomu rozróżnialności α_ν.

W opinii autora najdogodniejsze jest sprowadzenie elementów macierzy $m_{ij}^{(\alpha_\nu)}$ do pierwszego poziomu α_1, co w konsekwencji oznacza, że wzór (28) przyjmuje postać:

(29) $$m_{ij}^{(\alpha_1)} = \frac{\left(\frac{1}{\alpha_1} - 1\right)}{\left(\frac{1}{\alpha_\nu} - 1\right)} \cdot m_{ij}^{(\alpha_\nu)}$$

Wyznaczone w powyższy sposób elementy macierzy oceny **M** tworzą nową uporządkowaną macierz oceny $\boldsymbol{M}^{(\alpha_1)} = \left[m_{ij}^{(\alpha_1)} \right]$.

Łatwo zauważyć, że w procedurach obliczeniowych elementów macierzy oceny, dotychczas nie uwzględniano wag poszczególnych kryteriów cząstkowych. Współczynniki wagowe λ_j (wyznaczone za pomocą procedur, opisanych poprzednio i spełniające warunek $\sum_{j=1}^{k} \lambda_j = 1$) są uwzględnione w poniżej przedstawionym wzorze na globalną sumę $S_i^{(\alpha_b)}$ uzyskanych rang punktowych przez *i*-tą strategię (ocenioną wg *j* kryteriów cząstkowych na poziomie odniesienia α_b) w następujący sposób:

(30) $$S_i^{(\alpha_b)} = \sum_{j=1}^{k} \lambda_j \cdot m_{ij}^{(\alpha_b)}$$

Mając wyznaczoną w powyższy sposób sumę $S_i^{(\alpha_b)}$ dla *i*-tej strategii inwestycyjnej, wyznacza się miarę oceny f_i wg formuły [11]:

(31) $$f_i = \frac{S_i^{(\alpha_b)}}{S_{\max}^{(\alpha_b)}}$$

gdzie $S_{\max}^{(\alpha_b)}$ jest sumą maksymalnych rang punktowych (możliwych do uzyskania w procedurze ustalania kolejności wariantów przez *i*-tą strategię ocenianą wg wszystkich *k* kryteriów), obliczaną wg wzoru:

(32) $$S_{\max}^{(\alpha_b)} = \left(\frac{1}{\alpha_b} - 1 \right) \cdot k$$

Dla założonego uprzednio sposobu sprowadzania wartości macierzy oceny do pierwszego układu odniesienia $(\alpha_b = \alpha_1)$ wzory (30, 31, 32), przyjmują postać:

(33) $$S_i^{(\alpha_1)} = \sum_{j=1}^{k} \lambda_j \cdot m_{ij}^{(\alpha_1)} ,$$

(34) $$f_i = \frac{\sum_{j=1}^{k} \lambda_j \cdot m_{ij}^{(\alpha_1)}}{\left(\frac{1}{\alpha_1} - 1 \right) \cdot k} ,$$

(35) $$S_{\max}^{(\alpha_1)} = \left(\frac{1}{\alpha_1} - 1 \right) \cdot k .$$

Pozycje poszczególnych strategii inwestycyjnych na syntetycznej skali oceny efektywności mają charakter formalny. Oznacza to, że wartości miary oceny *f* są względne (strategie są najlepsze w rozpatrywanej klasie zbiorowości, a nie absolutnie najlepsze). Niemniej jednak jest możliwy i wskazany podział miary oceny na syntetycznej skali efektywności na kilka grup, tworzących tzw. izosfery efektywności zależnie od stopnia rozróżnialności α. Korzystając z wcześniej przyjętych poziomów rozróżnialności, można miarę efektywności f_i podzielić na izosfery ze skokiem α_ν [11,13].

Powyższy zabieg umożliwia dokonanie wyboru najlepszej strategii w zależności od pożądanej przez inwestorów skali dokładności wg miary oceny f_i zawartej w przedziale $\langle 0, 1 \rangle$.

Z przedstawionej procedury wynika, że strategie inwestycyjne o wysokiej efektywności przyjmują wartości bliskie jedności, natomiast o niskiej – przyjmują wartości bliższe zeru. Mając tak zestawione miary oceny efektywności, można łatwo dokonać wyboru racjonalnej decyzji inwestycyjnej z punktu widzenia wielu kryteriów technicznych, ekonomicznych, ekologicznych i społecznych. Jest to szczególnie istotne w przypadku programowania rozwoju elektroenergetyki w warunkach rynkowych.

Uwagi końcowe

Przedstawione w niniejszej pracy wybrane zagadnienia zastosowania technik modelowania ekonometrycznego pokazują znaczną ich przydatność w planowaniu rozwoju elektroenergetyki. Jest to szczególnie istotne w procesach programowania i oceny efektywności inwestowania w źródła wytwórcze ciepła i energii elektrycznej.

Jak wynika z przeprowadzonych w ostatnich latach przez autora badań własnych, przedstawione techniki modelowania umożliwiają podejmowanie racjonalnych decyzji w zakresie inwestowania w elektroenergetyce.

Niniejszy referat opracowano na podstawie wcześniejszej pracy autora [13].

LITERATURA

[1] Aburdene M. F.: Computer Simulation of Dynamic Systems. C. Brown, Dubuque, Iowa USA, 1988.
[2] Ackoff R. L.: Decyzje optymalne w badaniach systemowych. Warszawa: PWN 1968.
[3] Baas M.S., Kwakernaak H.: Rating and Ranking of Multiple-aspect Alternatives Using Fuzzy Sets. *Automatica* 13, 1997.
[4] Beccali M. i in.: Decision Making in Energy Planning: the Electre Multicriteria Analysis Approach Compared to a Fuzzy-Sets Methodology. Proc. FLORA' 97, Florence 1997.
[5] Borys T.: Metody normowania cech w statystycznych badaniach porównawczych. *Przegląd Statystyczny* nr 2, Warszawa: PWN 1978.
[6] Chen S.: Fuzzy linear combination of fuzzy linear functions under extension principle and second function principle. *Oxford Journal of Management Science*, nr 1, 1985.
[7] Dubois D., Prade H.: Fuzzy Sets and Systems Theory and Applications. New York Academic Press, 1980.
[8] Fiszel M.: Teoria efektywności. Warszawa: PWN 1979.
[9] Grabisch M., Nguyen H., Walker E.: Fundamentals of Uncertainty Calculi with Application to Fuzzy Inference. Dordrecht: Kluwer Academic 1995.
[10] Janiczek R.: Celowość zmiany struktury paliwowej krajowej elektroenergetyki. IX Konferencja „Zagadnienia surowców energetycznych w gospodarce krajowej", Zakopane, 9–11 października 1995.
[11] Kamrat W.: Metodologia oceny efektywności inwestowania na lokalnym rynku energii. Seria Monografie nr 5. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 1999.

[12] Kamrat W.: Metoda wielokryterialnej oceny efektywności inwestowania w elektroenergetyce. *Elektroenergetyka*, nr 4, 2001.
[13] Kamrat W.: Metody oceny efektywności inwestowania w elektroenergetyce. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2004
[14] Kaszowska B.: Planowanie rozwoju elektroenergetycznej sieci przesyłowej w warunkach urynkowienia elektroenergetyki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, n. 115, Opole 2000.
[15] Malko J.: Optymalizacja struktury mocy wytwórczych na rynku lokalnym. *Rynek Energii*, nr 5, 1997.
[16] Mirofushi T., Sugeno M.: A theory of fuzzy measures. Representation, the Choquet integral and null sets. *Journal Math. Anal. Appl.*, 159, 1991.
[17] Nowak E.: Problemy doboru zmiennych do modelu ekonometrycznego. Warszawa: PWN 1984.
[18] Shapley L.: A value for n-person games. W: [Contributions to the Theory of Games, vol. II], University of Princeton Press 1953.
[19] Strahl D.: Propozycja konstrukcji miary syntetycznej. *Przegląd Statystyczny* nr 2, Warszawa: PWN 1978.
[20] Vallee D., Zielniewicz P.: Electre III-IV, version 3.x – Aspects méthodologiques. Document du Lamsade no 85. Paris: Université Paris-Dauphine 1994.
[21] Zadeh L.A.: Fuzzy Sets. *Information and Control*, nr 8, 1965.
[22] Zimmermann H.: Fuzzy Set Theory and Its Application. Amsterdam: Kluver Acad. Publ. 1987.
[23] Zieńko J.: Proces oceniania cz. VI. Modelowanie preferencji, równoważności i nieporównywalności. *Problemy Ocen Środowiskowych*, nr 1 (16), Gdańsk 2002.

***Autor**: prof. dr hab. inż. Waldemar Kamrat prof. zw. PG, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, katedra Elektroenergetyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-219 Gdańsk, E-mail: w.kamrat@ely.pg.gda.pl;*