WSPOMAGANIE DECYZJI O BUDOWIE ELEKTROWNI JĄDROWYCH METODAMI ELECTRE

DOI: 10.33141/po.2019.09.02

Marek Michalski

Wprowadzenie

Z uwagi na dążenie do maksymalizacji zysku, co jest jednym z podstawowych celów działalności gospodarczej (Griffin i in., 2011, s. 6), decyzje o budowie elektrowni, w tym elektrowni jądrowych, podejmowane są przede wszystkim na podstawie kryteriów ekonomicznych. Aspekty ekologiczne i społeczne z reguły brane są pod uwagę tylko w takim zakresie, w jakim generują koszty – na przykład poprzez opłaty za emisję szkodliwych substancji lub korzyści ze sprzedaży certyfikatów za wytworzenie tzw. zielonej energii. Jednak coraz częściej, zarówno z powodu troski o środowisko naturalne, jak i trudne do przewidzenia, zwłaszcza w długim okresie, obostrzenia regulacji prawnych w zakresie eliminowania źródeł emisji szkodliwych substancji i gazów cieplarnianych, przedsiębiorstwa energetyczne uwzględniają kryteria ekologiczne i społeczne, nawet wtedy gdy nie generują obecnie kosztów lub nie ma pewności, że będą w przewidywalnej przyszłości je powodować.

Do kryteriów ekonomicznych należą w szczególności koszt budowy i eksploatacji, w tym paliwa. Kryteria ekologiczne to poziom zanieczyszczenia środowiska naturalnego w całym cyklu życia elektrowni i wymogi dotyczące wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz emisji gazów cieplarnianych, w tym dwutlenku węgla. Kryteria społeczne obejmują poziom i rodzaj zatrudnienia przy produkcji poszczególnych elementów elektrowni, w czasie budowy i eksploatacji, a także uciążliwość tych procesów dla otoczenia zewnętrznego. Autor wcześniej przedstawił metodykę optymalizacji tego typu decyzji na podstawie minimalizacji jednostkowego zdyskontowanego kosztu społecznego wytworzenia energii elektrycznej, co może być osiągnięte przez likwidację lub modernizację części istniejących bloków energetycznych, jak również przez budowę nowych bloków elektrowni lub elektrociepłowni, stosujących różne technologie wywarzania energii elektrycznej (Michalski, 2012, s. 13–14).

Podstawowym problemem takiego podejścia, oparte- go na jednym kryterium decyzyjnym – jednostkowym zdyskontowanym kosztem społecznym – jest konieczność wyrażenia wszystkich kryteriów w jednakowej jednostce miary: w tym przypadku pieniądzu. Można też w podobny sposób przypisać wagi poszczególnych kryteriów i dokonać optymalizacji w oparciu o ich ważoną sumę. Natomiast metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji, takie jak

ELECTRE, kładą nacisk na uwzględnienie różnych kryteriów w dłuższej perspektywie, bez konieczności ujednolicienia jednostek miary, oraz zapewnienie większej interakcji pomiędzy decydentami a analitykiem oraz zaangażowanie interesariuszy w proces podejmowania decyzji. Takie podejście jest trudniejsze z uwagi na wprowadzenie dodatkowych etapów i uczestników procesu decyzyjnego, ale pozwala lepiej określić uwarunkowania decyzji o budowie.

Budowa elektrowni jądrowych jest jedną z koncepcji zastąpienia przestarzałych elektrowni węglowych i uniknięcia opłat za uprawnienia do emisji gazów cieplarnianych, których ilość ma zostać zmniejszona, a cena wzrosnąć (Gabryś, 2018, s. 7, 15). Połączenie wykorzystania elektrowni jądrowych z obniżeniem energochłonności gospodarki i OZE umożliwia redukcję emisji gazów cieplarnianych (Chen, 2013, s. 53) przy zapewnieniu większego bezpieczeństwa niż dotychczas (Mu i in., 2015, s. 167–171). Opłacalność wykorzystania energii jądrowej względem OZE jest przedmiotem sporów (Khatib, Difiglio, 2016, s. 749).

Celem artykułu¹ jest usystematyzowanie kryteriów wspomaganie decyzji o budowie elektrowni jądrowej metodami wielokryterialnymi, szczególnie metodami ELECTRE. Problem ten jest złożony, gdyż wymaga odpowiedzi na pytania: Czy budować? Kiedy? Ile reaktorów? Jaki(e) reaktor(y)? Gdzie?

Dodatkowym utrudnieniem jest strategiczny aspekt tej decyzji, co oznacza, że są one najczęściej ostatecznie podejmowane na podstawie wizji decydentów, a nie racjonalnego procesu decyzyjnego, co znacząco utrudnia skonstruowanie modelu preferencji decydentów.

Energetyka jądrowa na świecie i w UE

Jak pisze M. Dąbrowski (2011), ludzkość zasadniczo stosuje trzy rodzaje oddziaływania do wytwarzania energii: grawitacyjne – wykorzystywane już przez społeczeństwo przedprzemysłowe, a obecnie w hydroelektrowniach; elektromagnetyczne – leżące u podstaw społeczeństwa przemysłowego, w którym przetwarzane i spalane są przede wszystkim węglowodory: węgiel, ropa, gaz; oraz jądrowe – wynikające ze zmiany konfiguracji składników jąder atomowych. Przy czym z jednej „spalonej” w procesie jądrowej cząstki otrzymujemy miliony razy więcej energii niż ze spalania węglowodorów.

Tak więc z małej ilości paliwa można otrzymać bardzo dużą ilość energii.

Pierwsze elektrownie jądrowe powstały w Rosji (1954 rok), Wielkiej Brytanii (1956 rok), USA (1957 rok), Francji (1963) i potem kolejne w latach 60. XX wieku w Belgii, Kanadzie, Niemczech, Japonii i Szwecji. W 2015 roku, elektrownie jądrowe były czwartym największym źródłem energii elektrycznej na świecie z 10,6% udziałem, po węglu, z którego wytwarzane było 39,3%, gazie ziemnym z udziałem 22,9% i elektrowniach wodnych dostarczających 16% energii elektrycznej. Z danych przedstawionych na rysunku 1 wynika, że zmniejszył się przede wszystkim udział ropy naftowej w wytwarzaniu energii elektrycznej z 24,8% w 1973 roku do 4,1% w 2015 roku, natomiast najszybciej wzrosło wykorzystanie odnawialnych źródeł energii z 0,6% do 7,1% w tym samym okresie, nie wliczając w to ujętych osobno hydroelektrowni.

Największym producentem energii elektrycznej z elektrowni jądrowych są Stany Zjednoczone, których produkcja wielkości 830 TWh stanowi blisko jedną trzecią całkowitej światowej produkcji i blisko 20% energii elektrycznej wytworzonej w tym kraju. Natomiast największy udział energetyki jądrowej w wytwarzaniu energii elektrycznej ma Francja, przy czym udział ten maleje – w roku 2015 wynosił blisko 78%, a w 2017 roku 72%. Na drugim miejscu jest Ukraina z udziałem 54% (IEA, 2017a, s. 19).

Podstawowym paliwem w elektrowniach jądrowych jest uran. Jego zasoby są bardzo duże i nie przewiduje się braku tego paliwa w najbliższych dziesięcioleciach; ceny uranu maleją od 2011 roku. Rozłożenie tych zasobów jest nierównomierne, przy czym jest ono mimo wszystko dużo bardziej równomierne niż węglowodorów: węgla kamiennego i brunatnego, gazu i ropy naftowej (BGR, 2017, s. 13, 96; BP, 2018, s. 27).

W 2016 roku ukończono na świecie budowę elektrowni jądrowych o łącznej mocy 10 GW – jest to największy

przyrost od 1990 roku (IEA, 2017b, s. 61). W budowie jest 60 dodatkowych elektrowni w 15 krajach o łącznej mocy 65 GW (w tym 21 reaktorów w samych Chinach) – wszystkie mają rozpocząć pracę do połowy lat 20. XXI wieku. W Japonii wznowiono pracę 12 reaktorów, po tym jak zostały zamknięte po katastrofie w Fukushima w 2011 roku (BGR, 2017, s. 13; IAEA, 2017, s. 7; IEA, 2017b, s. 232). Z drugiej strony, 26 z 28 krajów UE zobowiązało się do zaprzestania budowy nowych elektrowni jądrowych po 2020 roku (IEA, 2017b, s. 241). Niemcy zamknęły już dziewięć ze swoich 17 elektrowni jądrowych i ogłosiły plany zamknięcia pozostałych do 2022 roku (BGR, s. 13; IEA, 2017b, s. 730). Zgodnie z prognozami, produkcja energii elektrycznej z elektrowni jądrowych będzie stopniowo wzrastać przez następne 20 lat, przy czym wzrost będzie znacznie wolniejszy od tempa wzrostu popytu na energię elektryczną ogółem. Dlatego zgodnie z prognozami Międzynarodowej Agencji Energetycznej, udział energii jądrowej w podaży będzie malał (IEA, 2017b, s. 648, 650). Rysunek 2 przedstawia prognozę struktury wytwarzania energii elektrycznej w latach 2010–2040 oraz mocy zainstalowanej w roku 2040. Ilość energii jądrowej wrasta, ale udział maleje, przy rosnącym udziale odnawialnych źródeł energii.

Zgodnie z prognozami opartymi w dużej mierze na elektrowniach i blokach energetycznych, które są obecnie w budowie lub na zaawansowanym stadium przygotowania do budowy, wzrost mocy produkcyjnych netto elektrowni jądrowych będzie stosunkowo niewielki w porównaniu z pozostałymi źródłami energii, co ukazuje rysunek 3. Jednak różnica będzie w praktyce znacznie mniejsza ze względu na znacznie większy współczynnik wykorzystania tej mocy w elektrowniach jądrowych niż większości pozostałych. Wynika to ze stosunkowo niskiego kosztu paliwa i możliwości niemal ciągłej pracy z pełną mocą, w przeciwieństwie do produkcji elektrowni uzależnionych od ilości

Rys. 1. Ilość i struktura wytwarzania energii elektrycznej w latach 1973 i 2015

Źródło: IEA, 2017a, s. 30

Rys. 2. Prognoza struktury wytwarzania energii elektrycznej w latach 2010–2040 oraz mocy zainstalowanej w 2040 roku
Źródło: IEA, 2017b, s. 146

Rys. 3. Prognoza zamykania istniejących i budowy nowych elektrowni jądrowych do roku 2040
Źródło: IEA, 2017b, s. 246

przepływającej wody, prędkości wiatru, nasłonecznienia lub też elektrowni wykorzystujących stosunkowo drogie paliwa, szczególnie gaz ziemny i olej opałowy.

Obecnie największą zainstalowaną moc elektrowni jądrowych ma UE – jest to łącznie 127 GW, w tym nieco ponad połowa (66 GW) usytuowana jest we Francji, 11,4 GW w Niemczech, 10,4 GW w Wielkiej Brytanii i 10 GW w Szwecji. Na drugim miejscu są Stany Zjednoczone Ameryki z mocą 105 GW, a po nich Japonia, Chiny i Rosja. Przewidywana jest jednak zmiana w tym zakresie – największy wzrost przewidywany jest w Chinach (aż trzykrotny wzrost do 2030 roku), Indiach (do 63 GW w 2032 roku) i w mniejszym zakresie Rosji (do 30 GW w 2040 roku). Natomiast zgodnie z planami wycofywania energii jądrowej, moc zainstalowana w UE, Japonii i Korei ma ulec zmniejszeniu (IAEA, 2016; IEA, 2017b, s. 247–248).

Prognozuje się, że budowa nowych elektrowni jądrowych pochłonie 1,1 mld dolarów do roku 2040, z czego 63% będzie miało miejsce w krajach rozwijających się (IEA, 2017b, s. 251).

Podstawowymi wadami elektrowni jądrowych są wysokie koszty budowy, generowanie radioaktywnych odpadów oraz ryzyko skażenia środowiska naturalnego w przypadku

poważnej awarii lub ataku terrorystycznego. Przy czym wprowadzone od połowy lat 90. XX wieku pasywne zabezpieczenia reaktorów III (potem III+ i IV) generacji (IEA, NEA, 2015, s. 29–30; NEA, OECD, 2017, s. 57) oraz konstrukcje, które mają wytrzymać nawet uderzenie dużego samolotu, znacząco obniżają ryzyko skażenia środowiska naturalnego.

Kolejne rządy Polski i powiązane z nimi przedsiębiorstwa od wielu lat deklarują chęć i przedstawiają plany budowy pierwszej elektrowni jądrowej, przy czym terminy rozpoczęcia budowy były wielokrotnie przekładane. Opublikowana przez Ministerstwo Gospodarki i przyjęta przez Radę Ministrów w 2009 roku *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku* zakładała uruchomienie pierwszej polskiej elektrowni jądrowej do 2020 roku (MG, 2009, s. 16), ale dotychczas nie podjęto nawet ostatecznej decyzji o miejscu budowy, która, bazując na międzynarodowych doświadczeniach, potrwa co najmniej kilka lat. W przypadku budowy tego typu obiektów bardzo często występuje opóźnienie i przekroczenie budżetu inwestycji z powodu niedoszacowania rzeczywistego kosztu. Przyczyną wzrostu kosztu budowy są często zmiany technologiczne wprowadzane w trakcie budowy, mające na celu spełnienie regulacji prawnych w zakresie bezpieczeństwa.

Możliwość i celowość zastosowania metod ELECTRE

Wielokryterialne metody wspomagania decyzji, do których zaliczają się metody ELECTRE, umożliwiają modelowanie realnych sytuacji decyzyjnych obejmujących niepewność, niedokładność, niestałość i nieokreśloność danych, ocen i preferencji (Greco i in., 2016). Określenie „wspomaganie decyzji” zakłada udział analityka w procesie decyzyjnym. Jego zadaniem jest pomoc w definiowaniu wariantów decyzyjnych i ich konsekwencji, określaniu typu problematyki i konstruowaniu kryteriów oraz ostatecznie opracowaniu koncepcji agregacji ocen dokonanych z pomocą poszczególnych kryteriów.

Według R. Słowińskiego, metody te mają być przeciwwagą „powszechnej tendencji bezkrytycznego zastępowania decydenta automatyczną metodą rozwiązywania problemu decyzyjnego”, która „ze względu na arbitralnie przyjęty aparat matematyczny oraz kamuflaż informatyczny jest tylko pozornie ścisła i może wyświadczyć złą przysługę” (we wprowadzeniu do polskiego tłumaczenia: Roy, 1990, s. 11–12).

Metody te uwzględniają okoliczności i proces realnego podejmowania decyzji. Szczególnie to, że decyzje tylko wyjątkowo podejmuje jedna osoba, a nawet jeśli tak, to decyzja jest zazwyczaj poprzedzona wzajemnym oddziaływaniem decydenta i innych osób. Na podstawie studium literatury i analizy procesów inwestycyjnych, wstępnie wyodrębniono następujące kryteria oceny, obejmujące aspekty: ekonomiczny, ekologiczny i społeczny:

- Koszty: budowy i likwidacji, eksploatacji (nie licząc paliwa), paliwa, inne (specyficzne dla danego wariantu, obejmujące opłatę za emisję szkodliwych substancji i gazów cieplarnianych, korzyści wynikające w wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii lub konieczność zakupu certyfikatów) oraz kapitału (który może być różny w zależności od rodzaju zastosowanej technologii).
- Wskaźniki zanieczyszczenia środowiska naturalnego, tj. emisja: NO_x , SO_x , pyłów (PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$), rtęci, radioaktywnych substancji (z podziałem na odpady stałe i płynne oraz rozróżnieniem stopnia radioaktywności i/lub czasu połowicznego rozkładu).
- Wskaźniki społeczne: poziom zatrudnienia przy produkcji elementów elektrowni, podczas budowy oraz eksploatacji obiektu, a także wskaźnik „atrakcyjności” (uciążliwości, oporu lub poparcia społecznego).

Metodologia wielokryterialnego wspomagania decyzji obejmuje cztery podstawowe poziomy. Według B. Roya, nie należy tych poziomów traktować jako postępujące po sobie etapy, gdyż decyzje na niższym poziomie mogą następować lub być zmodyfikowane po analizie któregoś z wyższych poziomów. Poziomy są następujące (Roy, 1990, s. 48–51):

- 1) określenie przedmiotu decyzji i możliwych wariantów;
- 2) analiza konsekwencji i opracowanie kryteriów;
- 3) modelowanie preferencji i utworzenie koncepcji agregacji ocen;
- 4) opracowanie zalecenia, w sensie sugestii określonego zachowania.

Podstawą europejskiej szkoły wielokryterialnego wspomagania decyzji są relacje przewyższania. Rozróżnia się preferencję globalną dla danej alternatywy lub preferencję częściową w aspekcie danego kryterium i . Wartość globalnej preferencji $u(a)$ określa stopień preferencji alternatywy a . Na przykład preferencję alternatywy a_1 nad alternatywą a_2 oznacza się przez $a_1 \geq a_2$ na podstawie testu

$$\forall a_1, a_2 \in A, a_1 \geq a_2 \Leftrightarrow u(a_1) \geq u(a_2) \quad (1)$$

Z kolei preferencję częściową określa się symbolem $\geq_i$. Na przykład $a_1 \geq_i a_2$ oznacza częściową preferencję wariantu a_1 pod względem kryterium i .

Autor w tym artykule skupił uwagę na metodach ELECTRE – z francuskiego: *ELimination Et Choix Tra- duisant la REalité* (ang. *ELimination and Choice Expressing REality*), opracowanych w latach 60. XX wieku przez Bernarda Roya i jego współpracowników. Jest to zestaw podstawowych metod modelowania preferencji na podstawie relacji przewyższania stosowanych osobno dla każdego kryterium. W modelowaniu preferencji w ramach wielokryterialnego wspomagania decyzji rozróżnia się cztery podstawowe sytuacje preferencyjne (Roy, 1990, s. 92–93, 98):

- silna preferencja (P) odpowiada występowaniu przesłanek wskazujących silną preferencję jednego z dwóch wariantów;
- słaba preferencja (Q) określa istnienie przesłanek osłabiających silną preferencję jednego z dwóch wariantów;
- równoważność (I) oznacza istnienie przesłanek uzasadniających określenie równoważności dwóch wariantów;
- nieporównywalność (R) odpowiada brakowi przesłanek wskazujących na równoważność, silną lub słabą preferencję.

Opracowana metoda ELECTRE była początkowo trudna do zastosowania w praktyce. Jej ulepszeniem były kolejno metoda ELECTRE I, następnie ELECTRE II porządkowania alternatyw od najlepszej do najgorszej, metoda ELECTRE III opierająca się na rozmytej relacji przewyższania i pseudokryteriach, ELECTRE IV uwzględniająca tzw. próg weta, umożliwiające modelowanie niedoskonałości danych metoda ELECTRE IS oraz metoda umożliwiająca modelowanie zintegrowanej struktury relacji przewyższania bez zastosowania względnych współczynników ważności ELECTRE TRI. Możliwości zastosowania w omawianej problematyce innych metod opartych na relacjach przewyższania, takich jak PROMETHEE z wizualizacją GAIA, MACBETH lub PCCA oraz bazujących na funkcji użyteczności (MAUT), takich jak AHP lub UTA, wykraczają poza ramy niniejszego opracowania i będą przedmiotem innych publikacji autora.

W ramach wielokryterialnego wspomagania decyzji rozróżnia się cztery problematyki wzorcowe w odniesieniu do zbioru A wariantów decyzji. Przy czym w zależności od fazy procesu podejmowania decyzji problematyka może odpowiadać jednemu z wzorców lub kombinacji

Tabela 1. Kryteria oceny, interesariusze i dane o preferencjach dla wspomaganie decyzji o budowie elektrowni jądrowej

Kryterium oceny	Interesariusze	Dane o preferencjach
Koszty: budowy i eksploatacji, w tym paliwa oraz likwidacji obiektu.	<ul style="list-style-type: none"> • Inwestorzy. 	Pozornie oczywiste (chęć minimalizacji kosztu), ale oparte na słabej jakości danych (niepewnych prognozach).
Prognoza kosztu wytworzonej energii elektrycznej (energia jądrowa nie jest w chwili obecnej wykorzystywana do wytwarzania ciepła użytkowanego poza obiektem) i jej cen na rynku.	<ul style="list-style-type: none"> • Inwestorzy; • Przedsiębiorstwa; • Odbiorcy indywidualni (czyli prawie całe społeczeństwo). 	jw.
Poziom zanieczyszczenia środowiska naturalnego oraz emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia elektrowni; związany zarówno z samym obiektem, jak i przygotowaniem paliwa i utylizacji wszelkich odpadów.	<ul style="list-style-type: none"> • Inwestorzy; • Urzędy lokalne, krajowe i UE; • Politycy lokalni, krajowi i UE; • Osoby mieszkające w strefie oddziaływania; • Grupy interesów, takie jak np. związki zawodowe, tzw. zieloni. 	Preferencje są znane, ale mocno sprzeczne, szczególnie w zakresie postrzegania zagrożenia ociepleniem klimatu oraz kompromisu pomiędzy zmniejszeniem ilości konwencjonalnych zanieczyszczeń, a wytwarzaniem trudnych w utylizacji odpadów radioaktywnych.
Kryteria społeczne: – uwarunkowania polityczne; <ul style="list-style-type: none"> • naciski grup interesów; • poziom i rodzaj bezpośredniego i pośredniego zatrudnienia i usług w czasie budowy, eksploatacji i likwidacji; • uciążliwość (ewentualnie korzyści z) całego cyklu życia obiektu jak i również związana z przygotowaniem paliwa i utylizacją wszystkich odpadów; • rozwój wiedzy i konkurencyjności. 	<ul style="list-style-type: none"> • Osoby biorące bezpośredni udział w budowie, eksploatacji lub likwidacji obiektu; • Politycy lokalni i krajowi; • Osoby mieszkające w strefie oddziaływania; • Grupy interesów. 	Silne i mocno zakorzenione preferencje, często oparte na indywidualnych korzyściach lub uprzedzeniach.
Tolerancja ryzyka.	<ul style="list-style-type: none"> • Wszyscy wyżej wymienieni. 	<ul style="list-style-type: none"> • Preferencje są często silnie wyrażane, np. w formie protestów (szczególnie osób mieszkających w okolicy planowanej inwestycji lub zwracających uwagę na zanieczyszczenie środowiska naturalnego). • Preferencje są często subiektywne i podatne na zmianę i manipulację z uwagi na znikomy poziom wiedzy interesariuszy w tym zakresie.

Źródło: opracowanie własne

dwóch lub więcej z nich. Problematyki wzorcowe określa się następująco (Roy, 1990, s. 68–80):

1. Problematyka wyboru $P.\alpha$ – wspomaganie wyboru „najlepszego” wariantu. Może to być wskazanie zalecanej decyzji lub opracowanie metodyki nadającej się do wielokrotnego zastosowania. Ogólny sposób postępowania w tym przypadku określa metoda ELECTRE I.
2. Problematyka sortowania $P.\beta$ – przydzielająca warianty ze zbioru A do określonych kategorii (zwanych też klasami jakości) od najlepszej do najgorszej, co może mieć charakter zalecenia akceptacji pewnych wariantów do dalszej analizy lub określenia zwykłego udziału w kategorii. Może też obejmować opracowanie metodyki ułatwiającej ten proces.
3. Problematyka porządkowania (rankingu) $P.\gamma$ – wspomagająca porządkowanie wariantów według malejącej preferencji (od najlepszego do najgorszego) lub opracowanie procedury takiej klasyfikacji. Mają tu zastosowanie metody ELECTRE II, III i IV.
4. Problematyka opisu $P.\delta$ – wspomagająca opis wariantów i (lub) ich konsekwencji, czyli istotnych charakterystyk, w której chodzi bardziej o odpowiednie sformułowanie problemu niż jego rozwiązanie w ramach możliwie pełnego i ścisłego opisu.

Pierwsze trzy problematyki (α , β , γ) należą do grupy porządkujących, o czwarta (δ) do grupy opisowej. Jest to

rozszerzenie klasycznej teorii decyzji, która zakłada jedynie równoważność lub (silną) preferencję. Stosuje się też pojęcie skali preferencji oznaczone symbolem E , która jest zbiorem stanów uporządkowanych według porządku zupełnego (oznaczonego przez $\leq$). Może to być na przykład skala monetarna (np. dochodów, kosztów, zysku, stopy zwrotu), skala niezawodności (np. MTBF – średni czas między awariami) lub skala ryzyka.

Warianty (np. a i $a' \in A$) porównuje się ze sobą lub wybranymi normami na podstawie analizy ich konsekwencji. Istotnym problemem w wielokryterialnym podejmowaniu decyzji jest różnorodność, wielorakość, trudnodostępność lub niedostępność oraz zmienność w czasie analizowanych danych, szczególnie preferencji. Niezbędna jest też analiza konsekwencji danego wariantu a , które jak wskazuje B. Roy są często słabo określone, o rozmytych konturach, a ponadto złożone z elementów o złożonych wzajemnych relacjach. Do czasu ich sformalizowania nazywane są „chmurą konsekwencji” wariantu a oznaczoną jako $v(a)$ (Roy, 1990, s. 133, 137).

Konsekwencje wariantu wyraża się przez model oznaczany symbolem $\Gamma(A)$, który podsumowuje wszystkie dostępne dane opisujące wszystkie warianty a ze zbioru A . Model ten powinien spełniać trzy zasady: zrozumiałości, uniwersalizmu (odzwierciedlać to, co jest podstawowe i jednomyślne w ocenie preferencji dotyczących poszczegól-

Rys. 4. Etapy wielokryterialnego wspomaganie podejmowania decyzji o budowie elektrowni jądrowej metodami ELECTRE
Źródło: opracowanie własne

gólnych wariantów) oraz niezawodności (ukazać stopień niezawodności, tj. znaczenia, ważności i dokładności). Jest to istotne ze względu na częstą konieczność analizy atrybutów lub skutków, które są częściowo subiektywne i/lub słabo kwantyfikowalne (Roy, 1990, s. 164–165).

Porównania i ostatecznie oceny wariantów dokonuje się na podstawie kryteriów oceny, czyli wskaźników lub mierników, które są opracowywane na podstawie modelu konsekwencji $\Gamma(A)$. Na tej podstawie określone są tzw. funkcje kryterialne (kryterium) oznaczone literą g . Na przykład gdy $g(a) \leq g(a')$, oznacza to relację przewyższania wariantu a przez wariant a' dla kryterium g . Na podstawie tego rodzaju analiz opracowuje się ostatecznie rodzinę kryteriów oznaczoną literą F .

Ostatecznym problemem procesu wspomaganie decyzji jest agregacja ocen, dokonanych na podstawie wyznaczonych kryteriów oceny. Wyróżnia się tu agregację przez sumę ważoną, czyli gradację wyrażoną, agregację addytywną i multiplikatywną. Agregacja addytywna, czyli ważona średnia arytmetyczna, określona jest wzorem (2), zachowując warunki (3):

$$g(a) = \sum_{i=0}^n k_i g_i(a) \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n k_i = 1 \quad (3)$$

gdzie: $g_i(a)$ – wartość kryterium i dla wariantu a ; k_i – waga kryterium i .

Model ten można uogólnić (Roy, 1990, s. 246) w następujący sposób:

$$g(a) = \sum_{i=0}^n k_i v_i[g_i(a)] \quad (4)$$

$$0 \leq v_i[g_i] \leq 1, \quad \sum_{i=0}^n k_i = 1 \quad (5)$$

gdzie: $v_i[g_i]$ – niemalejąca funkcja g_i (tj. wartości kryterium i), k_i – waga kryterium i .

Często stosuje się też następującą formę agregacji, zwaną agregacją multiplikatywną, czyli ważoną średnią geometryczną, która może być wyrażona wzorem (Roy, 1990, s. 246–247):

$$g(a) = \frac{1}{k} \left[\prod_{i=1}^n (1 + k k_i g_i(a)) - 1 \right] \quad (6)$$

$$0 \leq k_i \leq 1, \quad \sum_{i=0}^n k_i \neq 1, \quad k > -1, \quad k \neq 0 \quad (7)$$

gdzie: $g_i(a)$ – wartość kryterium i dla wariantu a , k_i – waga kryterium i , k – współczynnik skalujący.

Podstawowymi kryteriami oceny we wspomaganie decyzji o budowie elektrowni jądrowej są koszty związane z budową, eksploatacją i likwidacją elektrowni jądrowej, prognoza kosztu wytworzonej energii i cen na rynku, poziom zanieczyszczenia środowiska naturalnego, kryteria społeczne i tolerancja ryzyka (Michalski, 2012). Zbiór ten został uporządkowany w tabeli 1.

Proces decyzyjny przedstawiono na rysunku 4. Ze względu na głównie strategiczny charakter wyboru technologii wytwarzania energii elektrycznej, rozbieżne preferencje i kryteria oceny na pierwszym etapie nie polecono zastosowania metod typu α (wyboru) i γ (porządkowania), celowe może być natomiast zastosowanie problematyki opisu δ . Natomiast metoda ELECTRE może być zastosowana do wspomaganie decyzji na szczeblu taktycznym, na przykład po podjęciu decyzji o budowie elektrowni jądrowej, do wyboru jednej z kilku dostępnych technologii stosowanych w tego typu elektrowniach. Metody te mogą również być stosowane na poziomie operacyjnym.

Podsumowanie

Prezentowana analiza wykazała złożoność decyzji inwestycyjnych w energetyce. Decyzje o budowie elektrowni, w tym elektrowni jądrowych, podejmowane są zazwyczaj na podstawie kryteriów ekonomicznych, a kryteria ekologiczne i społeczne brane są pod uwagę tylko w takim zakresie, w jakim generują koszty lub korzyści. Jednakże inwestorzy coraz częściej uwzględniają także kryteria ekologiczne i społeczne, nawet gdy nie generują one obecnie kosztów. Ocena możliwości wspomaganie decyzji o budowie elektrowni jądrowych metodami ELECTRE prowadzi do następujących wniosków:

1. Metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji, takie jak ELECTRE, kładą nacisk na uwzględnienie różnych kryteriów w dłuższej perspektywie, bez konieczności ujednolicenia jednostek miary, oraz zapewnienie większej interakcji pomiędzy decydentami a analitykiem oraz zaangażowanie interesariuszy w proces podejmowania decyzji.
2. Elektrownie jądrowe umożliwiają wytworzenie dziesiątek tysięcy razy więcej energii elektrycznej z danej masy paliwa niż elektrownie oparte na spalaniu węgla.
3. Zasoby paliwa jądrowego (uranu) są duże i bardziej równomiernie rozłożone na świecie niż zasoby węglowodorów. Prognozowany jest wzrost produkcji

energii elektrycznej z elektrowni jądrowych, największy w Chinach, ale przewiduje się, że udział tej energii w produkcji będzie malał, głównie z uwagi na wzrost produkcji z innych źródeł i częściowe zamykanie tego typu obiektów w UE.

4. Wielokryterialne metody wspomagania decyzji, do których zaliczają się metody ELECTRE, umożliwiają modelowanie realnych sytuacji decyzyjnych obejmujących niepewność, niedokładność, niestałość i nieokreśloność danych, ocen i preferencji.
5. Określenie „wspomaganie decyzji” zakłada udział analityka w procesie decyzyjnym. Jego zadaniem jest pomoc w definiowaniu wariantów decyzyjnych i ich konsekwencji, określaniu typu problematyki i konstruowaniu kryteriów oraz ostatecznie opracowaniu koncepcji agregacji ocen dokonanych z pomocą poszczególnych kryteriów.
6. Na etapie strategicznych decyzji czy budować elektrownie jądrowe, proces ten może być wspomagany wielokryterialnymi metodami wspomagania decyzji, szczególnie w ramach problematyki opisu P.δ. Decyzje w zakresie kiedy, gdzie i jaką elektrownię budować, może ułatwić problematyka porządkowania (rankingu) P.γ z metodami ELECTRE II, III i IV. Szczegóły operacyjne mogą być wspomagane metodą ELECTRE I w ramach problematyki wyboru P.α.

Syntetycznie rzecz ujmując, podstawowymi kryteriami oceny we wspomaganiu decyzji o budowie elektrowni jądrowych są koszty (budowy i eksploatacji, w tym paliwa oraz likwidacji obiektu), prognoza kosztu wytworzonej energii elektrycznej i cen na rynku, poziomu zanieczyszczenia środowiska naturalnego i emisji gazów cieplarnianych. Ponadto nasila się tendencja uwzględniania kryteriów społecznych (takich jak uwarunkowania polityczne, zatrudnienie, uciążliwość lub korzyści dla otoczenia) i poziomu tolerancji ryzyka.

dr inż. Marek Michalski
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Zarządzania
ORCID: 0000-0003-0122-3057
e-mail: Marek.Michalski@zarz.agh.edu.pl

Przypis

- ¹⁾ Wydanie publikacji finansowane przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie (dotacja podmiotowa na utrzymanie potencjału badawczego).

Bibliografia

- [1] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2017), *BGR Energy Study 2017*, BGR, Hannover.
- [2] BP (2018), *Technology Outlook 2018*, BP, London.
- [3] Chen Y.-H.H. (2013), *Non-nuclear, Low-carbon, or Both? The Case of Taiwan*, „Energy Economics”, Vol. 39, pp. 53–65.
- [4] Dąbrowski M. (2011), *Energetyka jądrowa w koegzystencji ze środowiskiem*, Polskie Towarzystwo Fizyczne, Warszawa.

- [5] Gabrys H.L. (2018), *Elektroenergetyka w Polsce 2018 – Próba osądu i refleksji wyników za rok 2017*, „Energetyka”, Nr 1, s. 7–15.
- [6] Greco S., Ehrgott M., Figueira J.R. (2016), *Multiple Criteria Decision Analysis*, Springer, New York.
- [7] Griffin R.W., Ebert R.J., Starke F.A., Lang M.D. (2011), *Business*, Pearson, Toronto.
- [8] International Atomic Energy Agency (IAEA) (2016), *Asia's Prospects for Nuclear Power Highlighted at Regional Conference*, <https://www.iaea.org/newscenter/news/asias-prospects-for-nuclear-power-highlighted-at-regional-conference>, access date: 1.06.2018.
- [9] International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017), *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2017 Edition*, IAEA, Vienna.
- [10] International Energy Agency (IEA) (2017a), *Key World Energy Statistics 2017*, IEA, Paris.
- [11] International Energy Agency (IEA) (2017b), *World Energy Outlook 2017*, IEA, Paris.
- [12] International Energy Agency (IEA), Nuclear Energy Agency (NEA) (2015), *Nuclear Energy Technology Roadmap 2015 Edition*, Paris.
- [13] Khatib H., Difiglio C. (2016), *Economics of Nuclear and Renewables*, „Energy Policy”, Vol. 96, pp. 740–750.
- [14] Michalski M. (2012), *Optymalizacja decyzji inwestycyjnych w elektroenergetyce*, Wydawnictwo AGH, Kraków.
- [15] Ministerstwo Gospodarki (MG) (2009), *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku*, Warszawa.
- [16] Mu R., Zuo J., Yuan X. (2015), *China's Approach to Nuclear Safety – From the Perspective of Policy and Institutional System*, „Energy Policy”, Vol. 76, pp. 161–172.
- [17] Nuclear Energy Agency (NEA), OECD (2017), *Nuclear Energy Data 2017*, Paris.
- [18] Roy B. (1990), *Wielokryterialne wspomaganie decyzji*, tłumaczenie: R. Słowiński, WNT, Warszawa.

Supporting Decisions on Constructing Nuclear Power Plants Using the Electre Methods

Summary

Making investment decisions in the power industry requires taking into account numerous criteria. On the one hand, efforts are made to minimise the costs of producing power resulting from capital investment, fuel and plant operation. On the other hand, the full life cycle of the facility and the impact of operating it on the environment and other external effects, the decommissioning of the facility and ensuring the appropriate quality and continuity of electricity supply should be considered. These criteria are often contradictory, which indicates the desirability of applying multi-criteria decision support methods. The article supports the concept and presents criteria for using the ELECTRE methods when making decisions on constructing nuclear power plants.

Keywords

capital investments, power industry, nuclear energy, ELECTRE