METODY ILOŚCIOWE W BADANIACH EKONOMICZNYCH
Tom XVIII/2, 2017, s. 335 – 348

Received: 07.06.2017
Accepted: 05.07.2017

KONSTRUKCJA PORTFELA PROJEKTÓW Z WYKORZYSTANIEM WIELOKRYTERIALNEGO PROGRAMOWANIA DYNAMICZNEGO[1]

Tadeusz Trzaskalik (ORCID: 0000-0001-5581-0922)
Maciej Nowak (ORCID: 0000-0002-8561-3863)
Wydział Informatyki i Komunikacji
Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach
e-mail: tadeusz.trzaskalik@ue.katowice.pl
maciej.nowak@ue.katowice.pl

Streszczenie: W pracy rozważany jest problem konstrukcji portfela projektów. Zakłada się, że znana jest lista projektów, które mogą być rozpoczęte natychmiast, a także lista kolejnych projektów, które z określonym prawdopodobieństwem mogą się pojawić w przyszłości. Rozważane zagadnienie sformułowano jako zadanie wielokryterialnego programowania dynamicznego. Zaproponowano procedurę interaktywną, która może być wykorzystana do jego rozwiązania. Kolejne rozwiązania próbne wyznaczono przy pomocy metody quasi-hierarchicznej. Sposób wykorzystania procedury zilustrowano przykładem numerycznym.

Słowa kluczowe: zarządzanie portfelem projektów, wielokryterialne programowanie dynamiczne, podejście interaktywne, metoda quasi-hierarchiczna, podejmowanie decyzji w warunkach ryzyka

WSTĘP

Projekty są podstawowym narzędziem, za pomocą którego firmy i instytucje realizują swoje strategiczne cele. W ostatnich latach znacznie wzrosła świadomość znaczenia zarządzania projektami. Wciąż jednak dość łatwo można odnotować przypadki nietrafionych decyzji w zakresie selekcji projektów lub ich niewłaściwego formułowania. Te dwa czynniki w sposób istotny ograniczają potencjał wzrostu organizacji oraz osłabiają jej pozycję konkurencyjną.

[1] Praca wykonana w ramach projektu badawczego NCN DEC-2013/11/B/HS4/01471.

DOI: 10.22630/MIBE.2017.18.2.32

Odpowiedzą na te problemy może być wdrożenie w organizacji odpowiedniej polityki, spinającej wizję organizacji i jej strategiczne cele z procesem selekcji projektów, ich realizacją oraz konsumpcją korzyści z nich wynikających. Kluczem do efektywnego zarządzania cyklem życia portfela projektów jest wybór właściwych projektów we właściwym czasie.

Każde przedsięwzięcie powinno mieć wyraźnie sformułowany cel. Powszechnie uważa się, że błędne jego zdefiniowanie należy do głównych przyczyn niepowodzeń w realizacji projektów. Jednocześnie jednak warto zauważyć, że jednoznaczność i klarowność, która jest zaletą w przypadku definiowania konkretnego przedsięwzięcia, staje się obciążeniem, gdy konstruowany jest cały portfel projektów. Zarówno badacze zajmujący się tą tematyką, jak też praktycy, są zgodni co do tego, że w tym wypadku należy uwzględnić całą wiązkę celów. Strategii organizacji nie da się bowiem zapisać w postaci jednego precyzyjnie sformułowanego celu, łatwo poddającego się kwantyfikacji. Tym samym również portfel projektów powinien być oceniany z różnych punktów widzenia, odpowiadających różnym celom szczegółowym, które organizacja zamierza osiągnąć w dłuższym horyzoncie czasu.

Problem konstrukcji portfela projektów jest szeroko rozważany w literaturze. Proponowane są zarówno bardzo proste modele oparte na podejściu scoringowym, jak też podejścia wymagające zastosowania zaawansowanych narzędzi obliczeniowych. Cel, jaki stawiają sobie ich autorzy często ogranicza się do uszeregowania projektów zgodnie z ich malejącą atrakcyjnością. W tym celu wykorzystywane są zarówno metody dyskretne, takie jak AHP, ELECTRE, PROMETHEE czy TOPSIS [por. Buchanan, Vanderpooten 2007, Amiri 2010, Vetschera, De Almeida 2012], jak też wielokryterialne programowanie całkowitoliczbowe. W tym drugim wypadku zakłada się zwykle, że zbiór analizowanych projektów jest bardzo liczny, a złożoność obliczeniowa problemu tak duża, że konieczne jest wykorzystanie metaheurystyk [Doerner i in. 2004, Carazo i in. 2010].

Problem konstrukcji portfela projektów był przedmiotem wcześniejszych prac autorów pracy. W pracy [Nowak 2005] zaproponowano podejście wykorzystujące metodę PROMETHEE-II, uwzględniające kryteria o charakterze ilościowym i jakościowym oraz ryzyko projektu. W celu przeprowadzenia analizy ryzyka projektu zastosowano symulację komputerową, a do porównania projektów wykorzystano reguły dominacji stochastycznej. Z kolei w pracy [Trzaskalik (red.) 2014] zaproponowano procedurę selekcji projektu, opartą na interaktywnej metody wspomagania decyzji DTEM-DPR oraz INSDECM.

Wymienione wyżej podejścia rozważają problem konstrukcji portfela projektów w kategoriach statycznych. Warto jednak zauważyć, że w tym wypadku konieczne jest nie tyle jednorazowe podjęcie decyzji, ale ustalenie strategii, jaką należy się kierować w dłuższym okresie czasu. Portfel zmienia się w sposób dynamiczny. Ukończenie określonego projektu pociąga za sobą zwolnienie zasobów, które w możliwie najkrótszym czasie powinny być ponownie zaangażowane. Niejednokrotnie, ze względu na zmiany w otoczeniu konieczne staje się wstrzymanie nawet bardzo zaawansowanego przedsięwzięcia. Problem konstrukcji portfela projektów warto zatem rozważać jako dynamiczny, wielokryterialny problem podejmowania decyzji, w którym istotną rolę odgrywa ryzyko. Efektywnym narzędziem modelowania i rozwiązywania tego typu problemów jest wielokryterialne programowanie dynamiczne, zwłaszcza w ujęciu stochastycznym.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie propozycji procedury interaktywnej, która może być wykorzystana do jego rozwiązania. Kolejne rozwiązania próbne, wyznaczane przy pomocy metody quasi-hierarchicznej. Praca składa się z pięciu rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono wykorzystywane dalej elementy z zakresu wielokryterialnego programowania dynamicznego. W rozdziale drugim konstrukcja portfela projektów przedstawiona została jako zadanie programowania dynamicznego. Rozdział trzeci to opis proponowanej procedury interaktywnej, której działanie zilustrowano w rozdziale czwartym. Pracę kończy podsumowanie.

WIELOKRYTERIALNE PROGRAMOWANIE DYNAMICZNE

Rozwój programowania dynamicznego datuje się od ukazania się pracy R. Bellmana [Bellman 1957], w której przedstawiona została zasada optymalności i wynikające z niej równania optymalności, pozwalające na rekurencyjne obliczenie strategii optymalnej. Programowanie dynamiczne wiąże się najczęściej z wieloetapowymi procesami decyzyjnymi. Mogą one mieć charakter deterministyczny, stochastyczny lub rozmyty, pojawiają się również (jak w niniejszej pracy) procesy o charakterze mieszanym.

W niniejszej pracy zajmiemy się procesami, w których liczba etapów jest z góry ustalona. Wyróżniamy zmienne stanu, opisujące stan procesu na początku kolejnych etapów oraz zmienne decyzyjne, na które decydent ma bezpośredni wpływ. Decyzje podjęte w etapach wcześniejszych mogą mieć istotny wpływ na możliwości podejmowania kolejnych decyzji w etapach późniejszych, gdyż zawężają, lub – przeciwnie – rozszerzają pole decyzyjne.

W ujęciu deterministycznym przejście procesu do kolejnego stanu w następnym etapie odbywa się zgodnie ze zdeterminowaną funkcją przejścia. Można więc powiedzieć, że wybór decyzji determinuje jednocześnie stan początkowy w następnym etapie [Trzaskalik 1990].

W ujęciu stochastycznym przejście procesu do kolejnego stanu w następnym etapie uzależnione jest od realizacji pewnej zmiennej losowej, opisującej oddziaływanie czynników losowych. Zazwyczaj zakładamy znajomość rozkładu prawdopodobieństwa tej zmiennej losowej. Może być również tak, że przejście pomiędzy stanami w kolejnych etapach ma charakter deterministyczny, natomiast wartości funkcji oceniającej przebieg procesu w danym etapie są zmiennymi losowymi z danymi rozkładami prawdopodobieństwa. Rozkłady te możemy porównywać z wykorzystaniem dominacji stochastycznych [Trzaskalik, Sitarz 2004].

Wieloetapowe procesy decyzyjne możemy również rozpatrywać w ujęciu rozmytym. Rozmyty charakter może mieć zarówno funkcja przejścia, jak również inne elementy procesu. Sterowanie procesami rozmytymi opisane jest szczegółowo w pracy [Kacprzyk 2001].

Chcąc porównać dwa rozwiązania w ujęciu wektorowym, wykorzystujemy zasadę optymalności Pareto. Jako zbiór rozwiązań optymalnych wektorowo przyjmujemy zbiór wszystkich rozwiązań niezdominowanych, czyli takich, że dla żadnego z nich nie istnieje rozwiązanie lepsze[2]. Rozwiązaniom niezdominowanym w przestrzeni kryterialnej odpowiadają rozwiązania sprawne w przestrzeni decyzyjnej. Rozwiązanie dynamicznego zadania wektorowej maksymalizacji polega na znalezieniu wszystkich rozwiązań sprawnych. Rozpatrując przypadek deterministyczny możemy wykorzystać zasadę optymalności w wersji wektorowej, opisaną w pracy [Trzaskalik 1990]. W przypadku stochastycznym poszukiwanie strategii sprawnych opisane zostało w pracy [Trzaskalik, Hoa 1999]. Poszukiwanie rozwiązań sprawnych w przypadku rozmytym, jak również w różnych przypadkach mieszanych opisali Trzaskalik i Sitarz [Trzaskalik, Sitarz 2004].

W każdym z rozpatrywanych powyżej przypadków znalezienie pełnego zbioru rozwiązań sprawnych może być kłopotliwe rachunkowo ze względu na brak stosownego oprogramowania. Ale nawet znalezienie pełnego zbioru rozwiązań sprawnych może być nieprzydatne w procesie wspomagania decyzji, jeżeli tylko zbiór ten jest zbyt liczny. Dlatego też w zagadnieniach praktycznych stosuje się zazwyczaj inne ujęcia, dbając jednocześnie o to, by rozwiązanie końcowe było rozwiązaniem sprawnym. W niniejszej pracy wykorzystamy ujęcie quasi-hierarchiczne w połączeniu z podejściem interaktywnym.

Podejście quasi-hierarchiczne polega na określeniu hierarchii kryteriów występujących w rozpatrywanym problemie decyzyjnym i sekwencyjnym rozwiązywaniu kolejnych problemów jednokryterialnych. Zbiorem rozwiązań dopuszczalnych kolejnego problemu jest zbiór rozwiązań optymalnych i prawie optymalnych, czyli takich, których wartości mieszczą się w określonym przez decydenta przedziale tolerancji.

Podejście interaktywne we wspomaganiu rozwiązywania problemów wielokryterialnych stosowane jest począwszy od lat siedemdziesiątych XX wieku [Benayoun i in. 1971, Steuer 1977, Miettinen, Mäkelä 2000, Nowak 2008, Özpeynirci i in. 2017]. Polega ono na wzajemnej interakcji pomiędzy decydentem

[2] Przez rozwiązanie lepsze od rozpatrywanego rozumiemy takie rozwiązanie, że każda składowa wektorowej funkcji kryterium pierwszego z tych rozwiązań jest lepsza lub równie dobra odpowiedniej składowej drugiego z rozwiązań i istnieje przynajmniej jedna składowa pierwszego rozwiązania, która jest lepsza od odpowiedniej składowej drugiego z nich. Relację „lepsze od” konstruujemy w każdym z wymienionych powyżej przypadków oddzielnie.

i wspomagającym go analitykiem, wyposażonym w odpowiednie informatyczne narzędzia optymalizacyjne.

Podejście interaktywne ma charakter iteracyjny. Każda iteracja rozpoczyna się od prezentacji decydentowi aktualnie proponowanego przez analityka rozwiązania próbnego. Decydent ocenia, czy rozwiązanie to satysfakcjonuje go ze względu na rozpatrywane kryteria decyzyjne. jeżeli tak, procedura zostaje zakończoną. jeżeli nie, decydent proszony jest o to, by określił te kryteria, których oceny należy poprawić, te, których oceny pozostać mają na tym samym poziomie oraz te, których oceny można pogorszyć. Zazwyczaj istniej również możliwość cofnięcia się do poprzedniego kroku, gdy okaże się, że wskazany uprzednio kierunek poprawy nie przyniósł akceptowanych przez decydenta wyników. Zazwyczaj też w każdym kroku procedury interaktywnej istnieje możliwość rozpoczęcia obliczeń od początku lub też odstąpienia od uzyskania rozwiązania końcowego w taki właśnie sposób.

Podejście interaktywne może być również wykorzystywane w przypadku poszukiwania rozwiązania końcowego w wielokryterialnych, wieloetapowych procesach decyzyjnych [Trzaskalik 1990, Trzaskalik 1998].

KONSTRUKCJA PORTFELA PROJEKTÓW JAKO ZADANIE PROGRAMOWANIA DYNAMICZNEGO

Przyjmijmy, że organizacja dokonuje systematycznego przeglądu swojego portfela projektów. Rozważamy okres czasu podzielony na *T* etapów. Na początku każdego etapu stan analizowanego procesu decyzyjnego wyznacza aktualny skład portfela. Przekłada się to bezpośrednio na ilość wolnych zasobów, jakie mogą być zaangażowane w realizację nowych przedsięwzięć. Zakładamy również, że znana jest lista projektów, które mogą być rozpoczęte w etapie 1, a dodatkowo lista projektów, które z określonym prawdopodobieństwem będą mogły być rozpoczęte w etapach kolejnych. Dostępna jest również informacja na temat ilości zasobów, jakie muszą być zaangażowane w realizację poszczególnych projektów, na podstawie której można określić zbiór decyzji dopuszczalnych dla każdego z rozważanych stanów procesu decyzyjnego.

W każdym etapie należy podjąć decyzję związaną z ewentualną modyfikacją portfela, polegającą na uruchomieniu nowych projektów, któremu może towarzyszyć wstrzymanie projektów, które nie zasługują na kontynuację. Projekty oceniane są ze względu na *K* kryteriów, przy czym każde z nich spełnia warunek addytywności, co oznacza, że wartość kryterium uzyskiwana dla portfela jest równa sumie wartości tego kryterium dla poszczególnych projektów.

Zadanie polega na określeniu, jakie decyzje powinny być podjęte w każdym z rozważanych etapów. Formułując problem w kategoriach programowania dynamicznego należy zdefiniować zbiory stanów dopuszczalnych na początku każdego etapu, zbiory decyzji, jakie mogą być podjęte w każdym z tych stanów oraz zbiór stanów końcowych. Stan, w jakim znajduje się proces na początku etapu t określa z jednej strony aktualny skład portfela, z drugiej zaś lista projektów, które mogą być do niego dodane. O ile stan procesu na początku etapu pierwszego jest znany, to o tym, w jakim stanie proces znajdzie się na początku każdego z następnych etapów decyduje zarówno podjęta decyzja, jak też to, które z rozważanych zdarzeń losowych rzeczywiście się zrealizuje. W analizowanym przypadku losowość procesu wynika z tego, że nie jest pewne, które z projektów będą mogły być rozpoczęte w kolejnych etapach.

Rozwiązanie tak zdefiniowanego problemu musi określać, jaka decyzja powinna być podjęta w etapie pierwszym, a także jakie decyzje powinny być podjęte w każdym z tych stanów, w którym proces może się znaleźć w którymś z kolejnych etapów. W pracy proponujemy skorzystanie w tym celu z procedury interaktywnej.

PROCEDURA INTERAKTYWNA

Przyjmijmy następujące oznaczenia:
K – liczba analizowanych kryteriów,
$\mathrm{X}^{(l)}$ – zbiór strategii rozważanych w iteracji l,
$\mathrm{x}^{(l)}$ – strategia proponowana decydentowi w iteracji l,
f^* – wektor idealny – wektor grupujący optymalne wartości oczekiwane poszczególnych kryteriów uzyskiwane w rozwiązaniach jednokryterialnych zadań programowania dynamicznego,
$\overline{\mathrm{f}}$ – wektor wartości optymistycznych – wektor, którego składowe są równe najlepszym wartościom oczekiwanym poszczególnych kryteriów uzyskanym w dotychczas rozważanych strategiach,
$\underline{\mathrm{f}}$ – wektor wartości pesymistycznych – wektor, którego składowe są równe najgorszym wartościom oczekiwanym poszczególnych kryteriów uzyskanym w dotychczas rozważanych strategiach,
$\hat{\mathrm{f}}$ – wektor wartości satysfakcjonujących – wektor grupujący wartości oczekiwane kryteriów, które decydent określił jako satysfakcjonujące.
Rozwiązanie końcowe problemu jest wyznaczane w sposób następujący:
Faza wstępna:

1. Prosimy decydenta o zdefiniowanie hierarchii kryteriów.
2. Rozwiązujemy K jednokryterialnych zadań programowania dynamicznego, w których kolejno optymalizujemy wartości poszczególnych kryteriów i wyznaczamy wektor f^*.
3. Wyznaczamy optymalne realizacje procesu ze względu na kryterium, które decydent umieścił na najwyższym poziomie hierarchii. Dla każdej z nich obliczamy wartości wszystkich kryteriów. Do zbioru $\mathrm{X}^{(1)}$ włączamy te spośród strategii zapewniających uzyskanie wartości optymalnej najważniejszego kryterium, które są niezdominowane.

4. Jako wartości początkowe współrzędnych wektora $\hat{f}$ przyjmujemy najgorsze wartości kryteriów uzyskiwane dla strategii włączonych do zbioru $X^{(1)}$.
5. Przyjmujemy $l = 1$.

Iteracja l:

1. Wyznaczamy wektory $\overline{f}$ oraz $\underline{f}$, przyjmując za ich współrzędne odpowiednio najlepsze i najgorsze wartości kryteriów uzyskiwane dla strategii włączonych do zbioru $X^{(l)}$.
2. Określamy strategię $x^{(l)}$, która zostanie zaproponowana decydentowi. W tym celu sprawdzamy, które spośród strategii ze zbioru $X^{(l)}$ gwarantują uzyskanie takich wartości kryteriów, które nie są gorsze niż wartości zapisane w wektorze $\hat{f}$. Wyznaczając spośród nich kolejną propozycję dla decydenta kierujemy się hierarchią kryteriów.
3. Przedstawiamy decydentowi strategię $x^{(l)}$ oraz wektory f^*, $\overline{f}$, $\underline{f}$ oraz $\hat{f}$. Pytamy decydenta, czy wyniki uzyskiwane dla proponowanej strategii uważa za satysfakcjonujące. Jeżeli odpowiedź brzmi *Tak*, kończymy procedurę, przyjmując za rozwiązanie końcowe strategię $x^{(l)}$.
4. Prosimy decydenta o ponowne zdefiniowanie wektora $\hat{f}$.
5. Jeżeli wartość satysfakcjonująca dla kryterium uznawanego przez decydenta za najważniejsze nie jest gorsza niż dotychczasowa wartość pesymistyczna tego kryterium, to przechodzimy do kroku (7).
6. Korzystając z algorytmu wyznaczania strategii prawie optymalnych [Trzaskalik 2015], identyfikujemy wszystkie strategie pozwalające na uzyskanie wartości satysfakcjonującej dla najważniejszego kryterium. Dla każdej z nich obliczamy wartości wszystkich kryteriów. Do zbioru $X^{(l)}$ dodajemy te spośród nowo wyznaczonych strategii, które nie są zdominowane przez jakąkolwiek inną, wcześniej wyznaczoną.
7. Jeżeli w zbiorze $X^{(l)}$ istnieją strategie, dla których wartości wszystkich kryteriów nie są gorsze od wartości uznanych przez decydenta za satysfakcjonujące, przyjmujemy $X^{(l+1)} = X^{(l)}$, $l = l + 1$ i przechodzimy do kolejnej iteracji (krok 1).
8. Informujemy decydenta, że nie ma możliwości wyznaczenia strategii zapewniających uzyskanie wartości satysfakcjonujących dla wszystkich kryteriów. Następnie pytamy go, czy jest skłonny dokonać zmiany wartości satysfakcjonującej dla przynajmniej jednego kryterium. Jeżeli decydent udzielił odpowiedzi pozytywnej wracamy do kroku (4), w przeciwnym wypadku kończymy rozwiązywanie problemu, przyjmując, że wyznaczenie rozwiązania spełniającego wymagania decydenta nie jest możliwe.

Sposób wykorzystania procedury ilustruje poniższy przykład liczbowy.

PRZYKŁAD ILUSTRACYJNY

Firma aktualizuje portfel swoich projektów w cyklu półrocznym. Na początku roku rozważana jest realizacja trzech projektów: P1, P2 oraz P3. Firma dysponuje zasobami pozwalającymi na realizację co najwyżej dwóch z nich. Na podstawie badań przeprowadzonych przez dział sprzedaży stwierdzono, że istnieje stosunkowo duże prawdopodobieństwo, że w połowie roku pojawią się dwie nowe propozycje przedsięwzięć: P4 i P5. Zakłada się, że firma będzie w stanie przesunąć część zasobów z realizacji dotychczas realizowanych projektów na jeden nowy projekt, przy czym będzie to skutkowało niższym poziomem zysku uzyskanego z realizacji wcześniej uruchomionych projektów.

Zbiór stanów dopuszczalnych na początku etapu pierwszego Y_1 jest jednoelementowy, zaś zbiór decyzji, jakie mogą być podjęte w jedynym stanie dopuszczalnym w etapie 1 składa się z trzech elementów:

$\mathrm{Y}_1 = \left\{y_1^{(1)}\right\}, \quad \mathrm{X}\left(y_1^{(1)}\right) = \left\{x_1^{(1)}\right\},$

przy czym poszczególne decyzje oznaczają:

$x_1^{(1)}$ – uruchomienie projektów P1 i P2,

$x_1^{(2)}$ – uruchomienie projektów P1 i P3,

$x_1^{(3)}$ – uruchomienie projektów P2 i P3.

Stan na początku etapu drugiego wynika z decyzji podjętej w etapie pierwszym oraz wystąpienia jednego z czterech stanów natury:

1. do realizacji są gotowe oba nowe projekty P4 i P5 (prawdopodobieństwo 0,42),
2. do realizacji jest gotowy tylko projekt P4 (prawdopodobieństwo 0,28),
3. do realizacji jest gotowy tylko projekt P5 (prawdopodobieństwo 0,18),
4. żaden z projektów P4, P5 nie jest gotowy do realizacji (prawdopodobieństwo 0,12).

W efekcie na początku etapu drugiego proces może się znaleźć w jednym z 12 stanów:

$$\mathrm{Y}_2 = \left\{y_2^{(1)}, y_2^{(2)}, y_2^{(3)}, y_2^{(4)}, y_2^{(5)}, y_2^{(6)}, y_2^{(7)}, y_2^{(8)}, y_2^{(9)}, y_2^{(10)}, y_2^{(11)}, y_2^{(12)}\right\}$$

Opis sytuacji, którym odpowiadają te stany przedstawia tabela 1.

W zależności od stanu, w jakim proces znajduje się na początku etapu drugiego, możliwe jest podjęcie wszystkich lub niektórych spośród następujących decyzji:

$x_2^{(1)}$ – rezygnacja z rozpoczęcia któregokolwiek z projektów P4, P5,

$x_2^{(2)}$ – rozpoczęcie projektu P4,

$x_2^{(3)}$ – rozpoczęcie projektu P5.

Tabela 1. Lista stanów dopuszczalnych na początku etapu 2

Stan	Projekty włączone do portfela	Projekty, które mogą być włączone do portfela	Stan	Projekty włączone do portfela	Projekty, które mogą być włączone do portfela
$y_2^{(1)}$	P1, P2	żaden	$y_2^{(7)}$	P1, P3	P5
$y_2^{(2)}$	P1, P2	P4	$y_2^{(8)}$	P1, P3	P4, P5
$y_2^{(3)}$	P1, P2	P5	$y_2^{(9)}$	P2, P3	żaden
$y_2^{(4)}$	P1, P2	P4, P5	$y_2^{(10)}$	P2, P3	P4
$y_2^{(5)}$	P1, P3	żaden	$y_2^{(11)}$	P2, P3	P5
$y_2^{(6)}$	P1, P3	P4	$y_2^{(12)}$	P2, P3	P4, P5

Źródło: opracowanie własne

Zbiory decyzji dopuszczalnych dla stanów, w których proces może się znaleźć na początku etapu drugiego są następujące:

$$\mathrm{X}\left(y_2^{(1)}\right) = \mathrm{X}\left(y_2^{(5)}\right) = \mathrm{X}\left(y_2^{(9)}\right) = \left\{x_2^{(1)}\right\}$$
$$\mathrm{X}\left(y_2^{(2)}\right) = \mathrm{X}\left(y_2^{(6)}\right) = \mathrm{X}\left(y_2^{(10)}\right) = \left\{x_2^{(1)}, x_2^{(2)}\right\}$$
$$\mathrm{X}\left(y_2^{(3)}\right) = \mathrm{X}\left(y_2^{(7)}\right) = \mathrm{X}\left(y_2^{(11)}\right) = \left\{x_2^{(1)}, x_2^{(3)}\right\}$$
$$\mathrm{X}\left(y_2^{(4)}\right) = \mathrm{X}\left(y_2^{(8)}\right) = \mathrm{X}\left(y_2^{(12)}\right) = \left\{x_2^{(1)}, x_2^{(2)}, x_2^{(3)}\right\}$$

Stan końcowy procesu zależy od stanu, w jakim proces znalazł się na początku etapu drugiego oraz decyzji jaka została w nim podjęta. Proces może się zakończyć w jednym z dziewięciu stanów. Ich listę przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Lista stanów dopuszczalnych na końcu procesu

Stan	Skład portfela	Stan	Skład portfela	Stan	Skład portfela
$y_3^{(1)}$	P1, P2	$y_3^{(4)}$	P1, P3	$y_3^{(7)}$	P2, P3
$y_3^{(2)}$	P1, P2, P4	$y_3^{(5)}$	P1, P3, P4	$y_3^{(8)}$	P2, P3, P4
$y_3^{(3)}$	P1, P2, P5	$y_3^{(6)}$	P1, P3, P5	$y_3^{(9)}$	P2, P3, P5

Źródło: opracowanie własne

Decydent ocenia poszczególne strategie ze względu trzy kryteria:

- f^1 – łączna wartość bieżąca netto *NPV* portfela (w tys. zł),
- f^2 – łączna wartość sprzedaży nowych produktów (w tys. zł),
- f^3 – łączna wartość sprzedaży na nowym rynku (w tys. zł).

W tabeli 3 przedstawiono wartości etapowych funkcji kryterialnych w zależności od stanu, w jakim znajduje się proces i decyzji, jak w tym stanie została podjęta. Korzyści wynikające z ewentualnego uruchomienia w drugim etapie projektów P4 lub P5 uwzględniają niższy poziom zysku uzyskanego w efekcie realizacji projektów uruchomionych w etapie pierwszym.

Tabela 3. Wartości etapowych funkcji celu

$y_t^{(i)}$	$x_t^{(j)}$	f_t^1	f_t^2	f_t^3	$y_t^{(i)}$	$x_t^{(j)}$	f_t^1	f_t^2	f_t^3
$y_1^{(1)}$	$x_1^{(1)}$	105	0	2	$y_2^{(7)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0
$y_1^{(1)}$	$x_1^{(2)}$	100	5	3	$y_2^{(7)}$	$x_2^{(3)}$	-5	5	3
$y_1^{(1)}$	$x_1^{(3)}$	95	10	5	$y_2^{(8)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0
$y_2^{(1)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0	$y_2^{(8)}$	$x_2^{(2)}$	30	10	0
$y_2^{(2)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0	$y_2^{(8)}$	$x_2^{(3)}$	-5	5	3
$y_2^{(2)}$	$x_2^{(2)}$	15	10	0	$y_2^{(9)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0
$y_2^{(3)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0	$y_2^{(10)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0
$y_2^{(3)}$	$x_2^{(3)}$	-5	5	1	$y_2^{(10)}$	$x_2^{(2)}$	30	10	0
$y_2^{(4)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0	$y_2^{(11)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0
$y_2^{(4)}$	$x_2^{(2)}$	15	10	0	$y_2^{(11)}$	$x_2^{(3)}$	-5	5	3
$y_2^{(4)}$	$x_2^{(3)}$	-5	5	1	$y_2^{(12)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0
$y_2^{(5)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0	$y_2^{(12)}$	$x_2^{(2)}$	30	10	0
$y_2^{(6)}$	$x_2^{(1)}$	0	0	0	$y_2^{(12)}$	$x_2^{(3)}$	-5	5	3
$y_2^{(6)}$	$x_2^{(2)}$	30	10	0					

Źródło: opracowanie własne

Proces wyznaczenia rozwiązania problemu przebiega w sposób następujący:
Faza wstępna:

1. Decydent określa hierarchię kryteriów: f^1, f^2, f^3.
2. Rozwiązujemy trzy jednokryterialne zadania programowania dynamicznego, w których kolejno optymalizujemy wartości poszczególnych kryteriów. Wektor wartości idealnych ma postać: $\mathrm{f}^* = [121{,}0;\ 17{,}9; 6{,}8]$.
3. Jedyna strategia zapewniająca uzyskanie optymalnej wartości kryterium f^1 polega na wybraniu w pierwszym etapie projektów P1 i P2, a w etapie drugim, jeżeli to możliwe projektu P4. Projektu P5 nie należy uruchamiać, nawet jeżeli jest to możliwe. Strategię tą oznaczymy jako x_1. Wartości oczekiwane poszczególnych kryteriów uzyskiwane dzięki jej zastosowaniu są następujące: f^1: 121,0; f^2: 12,0; f^3: 3,0. Ponieważ tylko jedna strategia zapewnia uzyskanie wartości optymalnej dla najważniejszego kryterium (f^1), jest ona oczywiście niezdominowana i zostaje jako jedyna włączona do zbioru $\mathrm{X}^{(1)}$.

4. Jako wartości początkowe współrzędnych wektora $\hat{\mathrm{f}}$ przyjmujemy najgorsze wartości kryteriów uzyskiwane dla strategii włączonych do zbioru $X^{(1)}$: $\hat{\mathrm{f}} = [121{,}0; 12{,}0; 3{,}0]$.
5. Przyjmujemy $l = 1$.

Iteracja 1:

1. Wyznaczamy wektory wartości optymistycznych i pesymistycznych:
   $\bar{\mathrm{f}} = [121{,}0; 12{,}0; 3{,}0]$, $\underline{\mathrm{f}} = [121{,}0; 12{,}0; 3{,}0]$.
2. Jako pierwszą propozycję dla decydenta $x^{(1)}$ przyjmujemy strategię x_1. Jest to jedyna strategia należąca do zbioru $X^{(1)}$, a wartości kryteriów, jakie są dla niej uzyskiwane nie są gorsze niż wartości satysfakcjonujące zdefiniowane w fazie wstępnej procedury.
3. Przedstawiamy decydentowi strategię $x^{(1)}$ oraz wartości idealne (wektor f^*), optymistyczne (wektor $\bar{\mathrm{f}}$), pesymistyczne (wektor $\underline{\mathrm{f}}$) oraz satysfakcjonujące (wektor $\hat{\mathrm{f}}$). Ponieważ decydent uznaje, że proponowane rozwiązanie nie jest satysfakcjonujące, przechodzimy do następnego kroku.
4. Decydent poproszony o ponowne zdefiniowanie wektora $\hat{\mathrm{f}}$ podaje następujące wartości satysfakcjonujące:
   $\hat{\mathrm{f}} = [114{,}0; 16{,}0; 5{,}0]$
5. Ponieważ wartość satysfakcjonująca, którą decydent podał dla kryterium f^1 jest gorsza od dotychczasowo przyjmowanej, przechodzimy do kroku (6).
6. Korzystając z algorytmu wyznaczania strategii prawie optymalnych, identyfikujemy kolejne strategie zapewniające uzyskanie wartości satysfakcjonującej dla kryterium f^1: x_2, x_3, x_4 i x_5. Wartości kryteriów uzyskiwane dla tych strategii przedstawia tabela 4.

Tabela 4. Wartości kryteriów dla strategii wyznaczonych w iteracji 1

Strategia	f^1	f^2	f^3
x_2	120,1	12,9	3,5
x_3	116,0	17,0	5,0
x_4	115,5	7,0	2,0
x_5	114,6	7,9	2,2

Źródło: opracowanie własne

   Strategie x_4 oraz x_5 są zdominowane. Do zbioru $X^{(1)}$ zostają zatem dodane jedynie strategie x_2 oraz x_3.
7. Analizując wyniki uzyskiwane dla realizacji ze zbioru $X^{(1)}$ stwierdzamy, że strategia x_3 zapewnia uzyskanie wartości satysfakcjonujących dla wszystkich kryteriów. Wobec powyższego przyjmujemy $X^{(2)} = X^{(1)}$, $l = 2$ i przechodzimy do kolejnej iteracji.

Iteracja 2:

1. Do zbioru $X^{(2)}$ należą strategie x_1, x_2 oraz x_3. Wektory wartości optymistycznych i pesymistycznych mają postać następującą:
   $\bar{f} = [121{,}0; 17{,}0; 5{,}0]$, $\underline{f} = [116{,}0; 12{,}0; 3{,}0]$.
2. Jako kolejną propozycję dla decydenta $x^{(2)}$ przyjmujemy strategię x_3. Jest to jedyna strategia ze zbioru $X^{(2)}$, która pozwala na uzyskanie wartości satysfakcjonujących.
3. Przedstawiamy decydentowi strategię $x^{(2)}$ oraz wartości idealne (wektor f^*), optymistyczne (wektor $\bar{f}$), pesymistyczne (wektor $\underline{f}$) oraz satysfakcjonujące (wektor $\hat{f}$). Ponieważ decydent uznaje, że proponowane rozwiązanie nie jest satysfakcjonujące, przechodzimy do następnego kroku.
4. Decydent poproszony o ponowne zdefiniowanie wektora $\hat{f}$ podaje następujące wartości satysfakcjonujące:
   $\hat{f} = [110{,}0; 15{,}0; 5{,}5]$.
5. Ponieważ wartość satysfakcjonująca, którą decydent podał dla kryterium f^1 jest gorsza od dotychczasowo przyjmowanej, przechodzimy do kroku (6).
6. Korzystając z algorytmu wyznaczania strategii prawie optymalnych, identyfikujemy kolejne strategie zapewniające uzyskanie wartości satysfakcjonującej dla kryterium f^1: x_6, x_7, x_8, x_9 i x_{10}. Wartości kryteriów uzyskiwane dla tych strategii przedstawia tabela 5.

Tabela 5. Wartości kryteriów dla strategii wyznaczonych w iteracji 2

Strategia	f^1	f^2	f^3
x_6	113,3	17,9	5,5
x_7	112,6	9,2	3,0
x_8	111,7	10,1	3,5
x_9	111,3	4,2	2,0
x_{10}	110,4	5,1	2,2

Źródło: opracowanie własne

Jedynie strategia x_6 jest niezdominowana i ona zostaje dodana do zbioru $X^{(2)}$.

7. Analizując wyniki uzyskiwane dla realizacji ze zbioru $X^{(2)}$ stwierdzamy, że strategia x_6 zapewnia uzyskanie wartości satysfakcjonujących dla wszystkich kryteriów. Wobec powyższego przyjmujemy $X^{(3)} = X^{(2)}$, $l = 3$ i przechodzimy do kolejnej iteracji.

Decydent może w tym momencie zaakceptować strategię x_6 jako rozwiązanie końcowe lub kontynuować poszukiwanie rozwiązania jeszcze lepiej dopasowanego do jego oczekiwań w sposób analogiczny do opisanego powyżej. Przyjęcie jako rozwiązania końcowego problemu strategii x_6 oznaczałoby, że w pierwszym kolejności decydent powinien włączyć do portfela projekty P2 i P3, a w połowie roku, o ile to możliwe, włączyć do portfela projekt P4. Jeżeli jednak okaże się, że ostatnie przedsięwzięcie nie może być uruchomione, to należy sprawdzić, czy gotowy do realizacji jest projekt P5 i ewentualnie rozpocząć jego realizację.

ZAKOŃCZENIE

W pracy rozważano ważne w wielu dziedzinach praktyki zagadnienie wyboru portfela projektów jako dynamiczny problem wielokryterialny. Zaproponowane w pracy podejście interaktywne cechuje się prostotą, przez co powinno być dobrze rozumiane przez decydenta. Opracowanie kolejnego przykładu zastosowania metod interaktywnych do rozwiązywania istotnego zagadnienia praktycznego potwierdza potencjał tkwiący w podejściu interaktywnym.

Warto też zauważyć, że zagadnienie wyboru portfela projektów można byłoby rozpatrywać dynamicznie, uwzględniając możliwość zmiany preferencji decydenta w czasie. Takie zmiany mogą być powodowane na przykład sprawniejszą realizacją pewnych projektów niż pierwotnie zakładano, lub też przeciwnie – występującymi opóźnieniami. Warto byłoby w tym kontekście rozpatrzyć ujęcie zmiennej w czasie hierarchii kryteriów etapowych, przedstawione w pracy [Trzaskalik 2017].

BIBLIOGRAFIA

Amiri M. P. (2010) Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. Expert Systems with Applications, 37(9), 6218–6224.

Bellman R. (1957) Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton.

Benayoun R., De Montgolfier J., Tergny J., Laritchev O. (1971) Linear programming with multiple objective functions: Step method (STEM). Mathematical Programming, 1(3), 366–375.

Buchanan J., Vanderpooten D. (2007) Ranking projects for an electricity utility using ELECTRE III. International Transactions in Operational Research, 14(4), 309–323.

Carazo A. F., Gomez T., Molina J., Hernandez-Diaz A. G., Guerrero F. M., Caballero R. (2010) Solving a comprehensive model for multiobjective project portfolio selection. Computers & Operations Research, 37(4), 630–639.

Doerner K. F., Gutjahr W. J., Hartl R. F., Strauss C., Stummer C. (2006) Pareto ant colony optimization with ILP preprocessing in multiobjective project portfolio selection. European Journal of Operational Research, 171(3), 830–841.

Kacprzyk J. (2001) Wieloetapowe sterowanie rozmyte. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.

Korhonen P. J., Laakso J. (1986) A visual interactive method for solving the multiple criteria problem. European Journal of Operational Research, 24(2), 277–287.

Miettinen K., Mäkelä M. M. (2000) Interactive multiobjective optimization system WWW-NIMBUS on the Internet. Computers & Operations Research, 27(7-8), 709–723.