

WIELOKRYTERIALNE WSPOMAGANIE DECYZJI W HARMONOGRAMOWANIU PROJEKTÓW¹

Tomasz Błaszczyk*

Akademia Ekonomiczna w Katowicach

Maciej Nowak**

Akademia Ekonomiczna w Katowicach

Streszczenie: W pracy przedstawiono problematykę harmonogramowania projektów w ujęciu wielokryterialnym. Uzasadniono potrzebę formułowania problemów związanych z planowaniem czasu w projekcie z uwzględnieniem wielu kryteriów. Wskazano także różne sposoby definiowania takich problemów decyzyjnych oraz zaproponowano metody ich rozwiązywania. Szczególną uwagę poświęcono programowaniu celowemu oraz podejściu interaktywnemu. Zaproponowane modele zostały zilustrowane przykładami liczbowymi.

Słowa kluczowe: planowanie projektów, harmonogramowanie, wielokryterialne metody wspomaganie decyzji, programowanie celowe, podejście interaktywne.

MULTI-CRITERIA DECISION AIDING IN PROJECT SCHEDULING

Abstract: This paper describes the range of project scheduling problems in multi-criterial background. The need of formulation of time planning issues according to multiple criteria was justified in the first chapter. Then, different approaches of defining such problems were indicated and methods for solving were proposed. The particular attention was focused on goal programming and interactive approaches. Proposed models were illustrated with numerical examples.

Keywords: project planning, scheduling, multi-criteria decision aiding methods, goal programming, interactive approach.

¹ Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy nr NN 111 267138.

* Tomasz Błaszczyk, Wydział Informatyki i Komunikacji, Katedra Badań Operacyjnych, Akademia Ekonomiczna w Katowicach, ul. Bogucicka 14, 40-226 Katowice, e-mail: tomasz.blaszczyk@ae.katowice.pl

** Maciej Nowak, Wydział Informatyki i Komunikacji, Katedra Badań Operacyjnych, Akademia Ekonomiczna w Katowicach, ul. Bogucicka 14, 40-226 Katowice, e-mail: maciej.nowak@ae.katowice.pl

1. Wstęp

Pojęcie projektu znajduje się od kilku lat w powszechnym użyciu w każdej niemalże dziedzinie życia społecznego i gospodarczego. Mianem projektów określa się zarówno różnego rodzaju dokumenty, jak też przedsięwzięcia. Każdy z obszarów, na którym tak rozumiane projekty są definiowane i realizowane, charakteryzuje się swoją wewnętrzną specyfiką oraz terminologią. Stąd też trudno o jednoznaczną definicję tego pojęcia. Jedną z nich, przytoczoną przez Tavaresa (2002) definiującą projekt jako „celowe przekształcenie systemu ze stanu początkowego s w stan s' ”, określony celami, które mają zostać osiągnięte” wydaje się w swojej ogólności zawierać postulaty wszystkich podmiotów podejmujących się przygotowania i realizacji projektów. Ważnym uzupełnieniem tej definicji jest jednak teza ograniczonego czasu trwania oraz niepowtarzalności, wskazana m.in. w standardach Project Management Institute (PMI) określających projekt jako „tymczasowe przedsięwzięcie podejmowane w celu wytworzenia unikalnego wyrobu lub usługi”.

Praca poświęcona jest harmonogramowaniu projektów. Przez harmonogram rozumieć będziemy terminarz określający momenty rozpoczęcia i zakończenia czynności składających się na projekt. Konstruując go, dążymy do tego, by przy spełnieniu ograniczeń wynikających z zależności zachodzących między czynnościami uzyskać optymalną wartość ustalonego kryterium.

Realizacja każdego projektu wymaga zaangażowania określonych zasobów. Zagadnienie harmonogramowania projektu nie może być zatem rozpatrywane w oderwaniu od problemu alokacji zasobów. Wstępny plan realizacji projektu dopiero wtedy staje się prawdziwym harmonogramem, gdy uwzględnione zostaną ograniczenia zasobowe. Stajemy wówczas przed zagadnieniem określanym w literaturze jako problem harmonogramowania projektów przy ograniczeniach zasobowych (ang. *RCPSP – Resource-Constrained Project Scheduling Problem*).

Kompleksowa ocena harmonogramu realizacji projektu powinna uwzględniać wiele kryteriów. Do podstawowych należą czas, w którym projekt może być zrealizowany, oraz koszt, który będzie musiał być poniesiony. Obok nich rozważa się często takie kwestie, jak terminowość realizacji kolejnych etapów projektu, jakość osiągniętych rezultatów projektu czy stopień wykorzystania posiadanych zasobów. Wymienione kryteria pozostają we wzajemnym konflikcie. Skrócenie czasu realizacji projektu wymaga zwykle zaangażowania dodatkowych zasobów, co skutkuje wzrostem kosztów. Z kolei dążenie do zapewnienia odpowiednio wysokiej jakości rezultatów niejednokrotnie pociąga za sobą zarówno wolniejsze tempo realizacji, jak i wzrost kosztów. Wreszcie przyjęcie za priorytet wyrównania zapotrzebowania na zasoby w poszczególnych etapach może pociągnąć za sobą wydłużenie terminu realizacji projektu.

Wielość kryteriów uwzględnianych w procesie harmonogramowania skłania do zastanowienia się nad metodami, które mogłyby być wykorzystane do ich rozwiązania. Należą do nich bez wątpienia techniki proponowane w ramach analizy wielokryterialnej. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie uzasadnienia potrzeby formułowania problemów z zakresu harmonogramowania projektów jako problemów decyzyjnych o wielu kryteriach oraz zaprezentowanie metod, które mogą być zastosowane do ich rozwiązania.

Konstruując model wielokryterialnego problemu decyzyjnego, skorzystać możemy z jednego z dwóch głównych podejść. Zgodnie z pierwszym, zbiór wariantów decyzyjnych definiowany jest przez warunki, które muszą one spełniać. Powiemy wówczas, że mamy do czynienia z polem decyzyjnym, które nie jest podane w sposób jawny (Krawczyk, 1990). Podejście alternatywne polega na zdefiniowaniu zbioru wariantów w sposób bezpośredni przez podanie kompletnej listy rozważanych rozwiązań. Tego typu zagadnienia określane są często mianem dyskretnych problemów decyzyjnych. W pracy stosujemy oba sposoby formułowania problemu decyzyjnego, przedstawiając zarówno model, w którym dopuszczalne warianty alokacji rozważanego zasobu definiowane są przez zbiór warunków ograniczających, jak również model definiujący pole decyzyjne w sposób jawny poprzez listę rozważanych sposobów wykorzystania zasobu. Pragniemy w ten sposób pokazać, że problem harmonogramowania projektów może być definiowany na różne sposoby, a co za tym idzie – do jego rozwiązania wykorzystać można różne narzędzia analizy wielokryterialnej.

Pracę rozpoczyna krótki rys historyczny dotyczący wspomagania decyzji w zarządzaniu projektami. Następnie formułujemy problem harmonogramowania jako zagadnienie wielokryterialne oraz proponujemy dwa modele wraz z metodami, które mogą być wykorzystane do ich rozwiązania. W obu wypadkach przyjmujemy, że celem analizy jest ustalenie takiej alokacji zasobów wykorzystywanych w projekcie, by harmonogram projektu zapewniał uzyskanie wartości kryteriów uznawanych przez decydenta za satysfakcjonujące. Model pierwszy sformułowany został jako zadanie programowania celowego. Zakładamy, że decydent jest w stanie określić wartości rozważanych kryteriów, które uznaje za satysfakcjonujące, a naszym celem jest wyznaczenie rozwiązania realizującego te aspiracje w stopniu możliwie najwyższym. Model drugi sformułowany zaś został jako zagadnienie dyskretnego podejmowania decyzji. Przyjmujemy w nim, że liczba rozważanych alokacji zasobów jest niewielka i może być opisana w sposób bezpośredni poprzez listę dostępnych wariantów decyzyjnych.

Jednym z istotnych zagadnień rozważanych w ramach zarządzania projektami jest ryzyko. Na etapie planowania projektu często nie dysponujemy wiedzą na tyle precyzyjną, by możliwe było dokładne oszacowanie wszelkich parametrów projektu, w tym w szczególności czasów realizacji poszczególnych czynności. Wydłużenie realizacji

niektórych zadań może z jednej strony przyczynić się do opóźnienia całego projektu, z drugiej zaś do podwyższenia jego kosztu. W sytuacji, gdy nie dysponujemy precyzyjną informacją na temat czasów realizacji czynności, warto skorzystać z metod pozwalających na oszacowanie ryzyka opóźnienia projektu lub wzrostu kosztu jego realizacji. Należą do nich techniki proponowane w ramach programowania stochastycznego, a w przypadku problemów ze stosunkowo niewielką liczbą wariantów decyzyjnych – metody dyskretnego wspomaganie decyzji w warunkach ryzyka, które wykorzystujemy w drugim z modeli zaprezentowanych w pracy.

Rozwiązywanie zadania wielokryterialnego nie jest możliwe bez pozyskania wiedzy na temat preferencji decydenta. Korhonen (2005) wyróżnia trzy podstawowe podejścia, które mogą być w tym celu wykorzystane:

- pozyskiwanie informacji o preferencjach decydenta przed uruchomieniem procedury obliczeniowej,
- pozyskiwanie informacji o preferencjach decydenta po zakończeniu podstawowej procedury obliczeniowej,
- stopniowe pozyskiwanie informacji o preferencjach decydenta równoległe z przeprowadzaniem obliczeń.

Podejście pierwsze zakłada wyraźne rozdzielenie fazy pozyskiwania wiedzy i fazy obliczeniowej. W tym ujęciu proces rozwiązywania problemu dzieli się na dwa etapy. W trakcie pierwszego pozyskiwana jest cała wiedza niezbędna do rozwiązania problemu. Etap drugi polega na przeprowadzeniu obliczeń, których wynikiem jest rozwiązanie końcowe. Metoda druga zakłada, że informacja o preferencjach decydenta pozyskiwana jest po wstępnym, czasami niepełnym, rozwiązaniu zadania wielokryterialnego. Wreszcie podejście ostatnie, nazywane w literaturze interaktywnym, przyjmuje, że decydent jest w stanie dostarczyć informacji o charakterze lokalnym, czyli takiej, która dotyczy ustalonego wariantu lub niewielkiego podzbioru zbioru wariantów decyzyjnych. Fazy pozyskiwania wiedzy oraz obliczeniowa są w tym wypadku wielokrotnie powtarzane, a decydent każdorazowo jest informowany o uzyskiwanych wynikach pośrednich.

Podejścia te mogą być wykorzystywane zarówno w przypadku, gdy zbiór wariantów zdefiniowany jest za pomocą warunków ograniczających, jak też wtedy, gdy jest podany w sposób bezpośredni, czyli w problemach dyskretnych. Procedura, za pomocą której rozwiązujemy pierwszy z modeli zaprezentowanych w pracy, oparta jest na założeniu, że informacja o preferencjach decydenta pozyskiwana jest przed uruchomieniem procedury obliczeniowej. Z kolei do rozwiązania problemu opisanego modelem drugim wykorzystaliśmy podejście interaktywne.

Modele zaprezentowane w pracy są rozwinięciem modeli prezentowanych we wcześniejszych pracach autorów. Podejście oparte na programowaniu celowym było

wcześniej prezentowane w rozprawie doktorskiej jednego z autorów (Błaszczuk, 2006). Z kolei dyskretny problem harmonogramowania projektów prezentowany był wcześniej w pracach: Błaszczuk, Nowak (2009) oraz Nowak, Błaszczuk, Fiala, Jablonsky (2009). W pierwszej z nich rozważaliśmy problem harmonogramowania pojedynczego projektu, w drugiej zagadnienie harmonogramowania w środowisku wieloprojektowym. W obu wypadkach do wyznaczenia rozwiązania problemu wykorzystaliśmy metodę INSDECM. W niniejszej pracy proponujemy wykorzystanie metody interaktywnej opartej na analizie współczynników wymiany.

2. Wspomaganie decyzji w harmonogramowaniu projektów

Pomimo iż projekty realizowane były już w cywilizacjach starożytnych (wspomnieć tutaj można np. budowę piramid egipskich czy Wielkiego Muru Chińskiego), to pierwsze formalnie określone narzędzia i metody powstały w czasach nowożytnych. Jedną z podstawowych technik, wykorzystywaną do dziś w szeroko pojętym zarządzaniu, a szczególnie w zarządzaniu projektami – technika wykresów paskowych – sformułowana została na początku XX wieku (Wilson, 2003). Pierwsza praca Gantta (Gantt, 1903) opisująca pierwotną wersję tego narzędzia ukazała się w marcu 1903 roku, równocześnie z pracą Taylora (Taylor, 1903), uznawanego za prekursora „Naukowego Zarządzania”. Obie prace współpracujących ze sobą autorów stanowiły integralną podstawę metodologii zarządzania fabryką zorientowaną na realizację indywidualnych zamówień klientów. Wykresy paskowe, nazywane również od nazwiska ich twórcy *wykresami Gantta*, wprowadziły kilka nowatorskich koncepcji zarządzania, takich jak rozkładanie procesu na serię poszczególnych zadań, wykonywanie pracy zgodnie z szacunkowymi normami dla tych zadań oraz śledzenie postępu prac w celu zapobieżenia odstępstwom od planu.

Narzędzie Gantta, pomimo określenia „graficzne”, było początkowo narzędziem raczej „tabelarycznym”, odwzorowującym ilościowe zapotrzebowanie na poszczególne środki produkcji w kolejnych dniach roboczych. Nazwę „harmonogram” oraz rozwiniętą formę wykresów paskowych zawdzięczamy jednakże polskiemu badaczowi – Karolowi Adamieckiemu, który stworzył podwaliny pod rozwój koncepcji naukowej organizacji w Polsce (Czech, 2004). Wyniki badań Adamieckiego (wraz z zespołem) nad harmonizacją pracy walcowni Huty Bankowej w Dąbrowie Górniczej, przeprowadzonych w latach 1895-1898, oraz podstawy graficznej metody planowania prac zbiorowych zaprezentowane zostały podczas posiedzenia Towarzystwa Technicznego w Jekatierinosławiu (dziś Dniepropietrowsk) w lutym 1903 roku, na miesiąc przed publikacją prac Taylora i Gantta. Jednakże dzięki wcześniej-

szemu rozpoczęciu badań przez Taylora to jemu właśnie przypisywane jest autorstwo koncepcji naukowego zarządzania.

Szczególnie intensywny rozwój techniki harmonogramowania miał miejsce w czasie pierwszej wojny światowej. W połowie lat 20. XX wieku harmonogramy paskowe były podstawowym narzędziem planowania produkcji, jednakże o niewielkim znaczeniu w zarządzaniu przedsięwzięciami jednorazowymi. Pierwsze aplikacje wykresów Gantta w planowaniu operacyjnym (m. in. przy budowie statków) miały miejsce w drugiej połowie lat 20. Korzyści wynikające ze stosowania metody w obrębie działalności poszczególnych przedsiębiorstw spowodowały wzrost zainteresowania nią w pozostałych gałęziach gospodarki. Jako pierwsze spektakularne projekty, przy realizacji których wykorzystano wykresy Gantta wymieniane są: budowa zapory Hoovera (rozpoczęcie realizacji w roku 1931) oraz międzystanowej sieci autostrad (od 1956 roku). Prostota użytkowania i łatwość odczytywania informacji powodowały dalsze rozszerzenie zakresu zastosowań harmonogramów paskowych, co w połączeniu z rozwojem technik obliczeniowych skutkuje powszechnością ich wykorzystania w czasach współczesnych.

Ważnym krokiem w rozwoju podejścia projektowego, poczynionym w pierwszej połowie XX wieku było sformułowanie ogólnej teorii systemów, stanowiącej teoretyczną podstawę dla nauk stosowanych: inżynierii systemów, badań operacyjnych oraz inżynierii psychospołecznej. Założenia ogólnej teorii systemów przedstawione przez von Bertalanfy'ego w 1937 roku (wydanie polskie: von Bertalanfy, 1984) odnosiły się początkowo do nauk biologicznych, jednakże szybko zostały wykorzystane w fizyce, chemii, matematyce, filozofii, a nieco później w socjologii i psychologii, teorii organizacji i naukach politycznych, urbanistyce, ekonomii. Projekt i zarządzanie projektem, jako zagadnienia interdyscyplinarne, których zastosowanie wymaga połączenia wiedzy między innymi z zakresu techniki i technologii z elementami psychologii i socjologii oraz ekonomią, teorią optymalizacji, teorią i praktyką organizacji, spełniają podstawowy postulat ogólnej teorii systemów całościowego traktowania obiektów jako systemów otwartych. Systemowa natura projektów szczególnie wyraźnie podkreślana jest w odniesieniu do realizacji technologicznych, szczególnie w zakresie informatyki (Szyjewski, 2001), jak również inżynierii lądowej (Jaworski, 1999; Rowiński, 1992). Systemowe spojrzenie na projekt umożliwiło dostrzeżenie wielu interakcji pomiędzy obiektami realizowanego projektu oraz obiektów znajdujących się w jego otoczeniu, lecz z nim powiązanych. Szerszego znaczenia nabrała rola relacji pomiędzy ludźmi biorącymi udział w realizacji projektu, w szczególności problemy komunikacji międzyludzkiej, co zapoczątkowało rozwój „miękkich”, niesformalizowanych aspektów zarządzania.

Okresem przełomowym dla rozwoju dyscypliny zarządzania projektami był koniec lat 50. XX wieku. Pojawiły się w tym czasie pierwsze prace opisujące nowatorskie narzędzia optymalizacyjne oparte na programowaniu sieciowym: metody CPM (*Critical*

Path Metod) oraz PERT (*Program Evaluation and Review Technique*). Oficjalne publikacje poprzedzone były jednakże tajnymi opracowaniami i wdrożeniami przeprowadzonymi przez Departament Obrony USA. Pierwsze udokumentowane udane próby zastosowania nowej, zorientowanej projektowo koncepcji organizacji prac, opartej na organizacji macierzowej (*matrix organization*), miały miejsce w początku lat 40. Wśród najbardziej spektakularnych wymienić należy projekt budowy i wykorzystania bomb jądrowych zrzuconych w 1945 roku na Hiroszimę i Nagasaki, znany pod kryptonimem *Manhattan Project* (1942-1947). Metodę ścieżki krytycznej po raz pierwszy wdrożono do prac planistycznych w koncernie chemicznym DuPont, natomiast stochastyczną metodę PERT w klasycznej wersji zastosowano w planowaniu programu *Polaris*, dzięki realizacji którego osiągnięto kompresję czasu jego realizacji o około 2 lata, dając USA wieloletnią przewagę w wyścigu zbrojeń nad Związkiem Radzieckim. Korzyści, uzyskiwane dzięki zastosowaniu metod sieciowych, zostały dostrzeżone również przez planistów gospodarczych krajów bloku wschodniego. Pierwsze zastosowania metody PERT w Polsce miały miejsce w latach 1963–1965 w Centralnym Biurze Konstrukcji Okrętowych w Gdańsku oraz w Dolnośląskim Biurze Projektów Górniczych przy ustalaniu harmonogramu budowy odkrywkowej kopalni węgla brunatnego w kopalni „Konin” (Benka, Matuła, 1967). W późniejszych latach nastąpił okres popularyzacji sieciowych technik planowania, co związane było zarówno z jego akceptacją w szerszych kręgach potencjalnych użytkowników (biura projektowe, ośrodki badawczo-rozwojowe itd.), jak i upowszechnieniem pierwszych komputerów. Wzrost potencjału obliczeniowego, umożliwiającego analizę sformalizowanych procesów projektu, spowodował również pojawienie się modyfikacji metod CPM i PERT oraz nowych metod sieciowych, takich jak: GERT (*Graphical Evaluation and Review Technique*), MPM – METRA, CYCLONE (*CYCLic Operations Network*). Dynamiczny wzrost zainteresowania metodyką zarządzania projektami spowodował w 1965 roku powstanie pierwszej organizacji zrzeszającej podmioty ją stosujące, noszącej wówczas nazwę INTERNET (dziś: *International Project Management Association – IPMA* z siedzibą w Holandii). Cztery lata później rozpoczął działalność *Project Management Institute (PMI)*. Według Kerznera (2001), w latach 70. zarządzanie projektami zostało obligatoryjnie wdrożone wśród dostawców amerykańskiego sektora obronnego, co stało się bodźcem do sukcesywnego wprowadzania go przez dalszych kooperantów. Na przełomie lat 70. i 80. do obligatoryjnego stosowania w zarządzaniu projektami zaczęły wchodzić państwowe akty normatywne, w tym niemieckie normy DIN 69900: *Netzplantechnik* (1970, 1974) oraz DIN 69901: *Projektmanagement*. W latach 90. stosowanie zarządzania projektami w firmach amerykańskich stało się już koniecznością. Rozpoczął się etap „nowoczesnego zarządzania projektami”, charakteryzującego się integracją wielu technik zarządzania projektami w celu optymalizacji wartości wyjściowych projektu (Kerzner, 2001). W większym stopniu doceniać zaczęto znacze-

nie organizacji i tworzących ją ludzi. Wskutek rosnącej presji konkurencyjnej wzrosła ranga jakości – trzeciego, obok czasu i kosztów, kryterium projektu.

Nawet najstarszym historycznym przykładom spektakularnych projektów zawsze musiała towarzyszyć faza przygotowawcza, w której przemysłom podlegały (różnorodne zapewne) koncepcje realizacji, dobór ludzi i narzędzi, miejsca i czasu, w którym działania te miały się urzeczywistnić. We współczesnych koncepcjach zarządzania projektami mówimy o fazach cyklu życia projektu. Najwcześniejsze z nich nazywane są przygotowawczymi lub przedinwestycyjnymi. Wewnątrz nich istotnego znaczenia nabierają procesy planowania. Ich wpływ na przebieg całego projektu jest niebagatelny zarówno ze względu na ich umiejscowienie w czasie, jak i towarzyszący im nakład pracy. Zakres działań planistycznych jest tak duży, że pojęcie planowania bywa często utożsamiane z pojęciem projektowania. Gasparski (1999) mówi wprost, że *projektowanie oznacza koncepcyjne przygotowanie działań*. Procesy planowania zmierzają do opracowania planu projektu – sformalizowanej projekcji efektu projektu (projektów technicznych, struktur organizacyjnych, makiet, wizualizacji itp.) wraz z określeniem czynności, które należy wykonać, aby ten cel osiągnąć, opisami sposobów ich realizacji, powiązań pomiędzy nimi oraz umocowaniem w całości działania organizacji. Prakseologiczne ujęcie projektowania wyróżnia następujące jego składowe: cel działania, kryteria jego osiągnięcia (system wartości podmiotu działania), metody oraz zasoby i narzędzia wykorzystane do osiągnięcia celu, realizatora oraz otoczenie, w którym projekt będzie realizowany. W dalszej części pracy nawiążemy w sposób szczególny do tej składowej, która dotyczy ustalenia systemu wartości podmiotu działania.

3. Harmonogramowanie projektu jako zagadnienie wielokryterialne

Miarą sukcesu projektu jest stopień osiągnięcia jego celów w ograniczonych warunkach jego realizacji. Uwarunkowania ograniczające dowolność jego realizacji wynikają z terminów realizacji projektu lub jego istotnych etapów, budżetu projektu, ograniczonej ilościowo i jakościowo puli dostępnych zasobów, technologii, wymagań klienta (lub inwestora) co do zakresu projektu i jakości jego rezultatów. Cele projektu mogą ponadto być różnie postrzegane przez różnych udziałowców projektu. Tak na przykład klient oczekuje zazwyczaj deklaracji najkrótszych terminów przy jak najniższych kosztach realizacji oraz wysokich standardach jakościowych. Dla wykonawcy z kolei istotne będzie założenie terminów późniejszych, lecz bardziej prawdopodobnych, co pozwala na ograniczenie ryzyka ich niedotrzymania. Dążąc do zwiększenia marży, będzie on również zainteresowany wynegocjowaniem wyższej ceny usług lub zapewnieniem sobie możliwości zastosowania tańszych materiałów. Jeszcze inny-

mi oczekiwaniami mogą kierować się sponsorzy projektów czy kierownicy funkcjonalni. Ze względu na mnogość podmiotów formułujących oczekiwania wobec projektu oraz liczbę jego parametrów podlegających ocenie (na etapie przygotowania planu projektu oraz po jego realizacji) można stwierdzić, że większość decyzji planistycznych musi zostać przeanalizowana z uwzględnieniem wielu kryteriów. Kryteria decyzyjne można podzielić na maksymalizowane, których zwiększenie wartości powoduje zwiększenie globalnej wartości wariantu, minimalizowane – takie, które poprzez zwiększenie swojej wartości pogarszają globalną ocenę wariantu, oraz nominalne – określające punktowo lub przedziałowo pożądaną wartość analizowanej cechy.

Stopień osiągnięcia celu projektu jest w większym lub mniejszym stopniu mierzalny w świetle kryteriów ilościowych. Najprostszym, intuicyjnym kryterium jest miara udany-nieudany. Mając w świadomości wyimaginowany obraz lub model tego, co zamierzaliśmy osiągnąć, można stwierdzić, na ile efekt działań satysfakcjonuje potrzebę, dla której podjęto trud projektowania. Oczywiście, zarówno wymóg prakseologiczny, jak i praktyka nie pozwalają na ocenę efektu względem jednego kryterium. Być może zamierzony cel zmaterializował się w zakładanej formie i treści, lecz okupione zostało to nieplanowanymi kosztami lub opóźnieniem w stosunku do zamierzonego terminu? Jeżeli jesteśmy jedynymi beneficjentami efektu projektowania – możliwe, że pogodzimy się z pewnymi odstępstwami od pierwotnych wyobrażeń. Natomiast jeżeli nie – niezbędne staje się określenie kryteriów mierzących preferencje zainteresowanych i pozwalających na jednoznaczną ocenę efektu projektowania. Jest to szerokie pole zastosowań metod wielokryterialnej oceny.

Poszczególne działania mogą charakteryzować się odmiennymi parametrami, które w różnym stopniu mogą wpływać na cechy całego projektu. Przykładem może być związek pomiędzy nakładem czasu na realizację pewnej czynności a terminami rozpoczęcia lub zakończenia czynności powiązanych z nią relacją poprzedzania/następowania. Przedłużenie czasu realizacji takiej czynności (w szczególności, gdy jest ona czynnością krytyczną) skutkuje koniecznością takiego przyspieszenia prac w czynnościach następujących, który zapewni dotrzymanie terminu realizacji całego projektu. Przyspieszenie takie, o ile w danym przypadku jest w ogóle możliwe, wymaga zaangażowania dodatkowych zasobów pracy, co wiąże się ze wzrostem kosztów realizacji przedsięwzięcia. Wzrost kosztów jest natomiast zjawiskiem negatywnym i niepożądanym. Zjawisko takie zachodzi również w kierunku przeciwnym – przekroczenie budżetu na pewnym etapie skutkuje koniecznością oszczędności w dalszej realizacji, co może przełożyć się na opóźnienia w terminach. Stąd też w najczęstszym przypadku, gdy w projekcie dąży się jednocześnie do jak najszybszego zakończenia realizacji oraz minimalizacji kosztów, mamy do czynienia z konfliktem kryteriów. Opisany przykład nosi w literaturze anglojęzycznej nazwę *time-cost trade-off*. W języku polskim nie funkcjo-

nuje termin będący dosłownym tłumaczeniem terminu angielskiego, stosuje się jednakże określenie *analizy czasowo-kosztowej* (Ignasiak, 2001; Trzaskalik, 2003). Szczegółowy przegląd algorytmów wyznaczających warianty rozwiązań problemu czasowo-kosztowego przedstawia praca Gaspars-Wieloch (2009). Poza wspomnianymi kryteriami czasu (terminów) oraz kosztu (ceny) w ocenie projektu uwzględnia się również kwestie związane z zakresem lub fragmentami zakresu projektu, kryteria jakościowe, kryteria efektywności finansowej i ekonomicznej oraz inne, specyficzne dla różnych branż i specjalności. Wiele przykładów kryteriów oceny projektów na podstawie studiów literaturowych omówiono m.in. w pracy Błaszczyka i Trzaskalika (2007). Oprócz analizy kryteriów decyzyjnych praca ta zawiera również wskazanie i klasyfikację metod wielokryterialnego podejmowania decyzji, których wykorzystanie w procesach planowania projektów zostało opisane w publikacjach naukowych i branżowych.

4. Programowanie celowe w harmonogramowaniu projektów

Jedną z dobrze znanych i często wykorzystywanych wielokryterialnych metod wspomaganie decyzji jest programowanie celowe. Metoda ta po raz pierwszy została opisana przez Charnesa i Coopera (1961). Jej ideą jest sprowadzenie wielokryterialnego problemu decyzyjnego do problemu jednokryterialnego. Podstawą dokonania takiej operacji jest określenie poziomów aspiracji – wartości docelowych poszczególnych kryteriów, które mogą mieć charakter punktowy lub przedziałowy. Zmienne decyzyjne modelu programowania celowego opisują różnice pomiędzy bieżącymi wartościami kryteriów a sformułowanymi dla nich poziomami aspiracji, natomiast funkcja celu przyjmuje postać ważonej sumy tych różnic.

Zadanie programowania celowego ma następującą postać: dla każdego z n kryteriów decyzyjnych w problemie wielokryterialnym, określonych funkcjami m zmiennych decyzyjnych:

$$K_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_m), \text{ dla } i = 1, 2, \dots, n$$

definiujemy poziomy realizacji kryteriów G_i oraz miary odchyień wartości kryteriów od poziomów zadanych:

$$g_i^+ = \begin{cases} K_i - G_i & \text{dla } K_i > G_i \\ 0 & \text{dla } K_i \leq G_i \end{cases}$$

$$g_i^- = \begin{cases} 0 & \text{dla } K_i > G_i \\ G_i - K_i & \text{dla } K_i \leq G_i \end{cases}$$

Model programowania celowego przyjmuje postać:

$$\sum_r \sum_i H_r w_{i,r}^+ g_i^+ + \sum_s \sum_i H_s w_{i,s}^- g_i^- \rightarrow \min$$

gdzie:

H_r, H_s – wskaźniki priorytetu (r w rankingu odchyień *in plus*, s w rankingu odchyień *in minus*) – celowi o wyższym priorytecie przyporządkowuje się większy wskaźnik priorytetu.

$w_{i,r}^+$ – waga odchylenia g_i^+ w rankingu r ,

$w_{i,s}^-$ – waga odchylenia g_i^- w rankingu s ,

przy zachowaniu dotychczasowych ograniczeń modelu wielokryterialnego.

Metoda programowania celowego znajduje szerokie zastosowania w procesach planowania projektów. Praca Błaszczyka i Trzaskalika (2007) w przeglądzie zastosowań metod wielokryterialnych podaje przykłady prac opisujących modele programowania celowego skonstruowane dla różnego rodzaju decyzji w procesach planowania projektów. W analizowanych przypadkach programowanie celowe jest wykorzystywane zarówno w postaci klasycznej (Dey et al., 1996), jak również w połączeniu z elementami innych metod, np. AHP – *Analytical Hierachical Process* (Radasch, Kwak, 1998) lub ANP – *Analytical Network Process* (Lee, Kim, 2000) wykorzystywanych w celu określenia wag kryteriów. Modele programowania celowego bywają również modyfikowane w celu dostosowania procedury obliczeniowej do realnego problemu decyzyjnego. Jako przykłady wskazać tutaj można modele binarne (Lee, Kim, 2000) oraz rozmyte (Arikan, Güngör, 2001). W pracy Błaszczyka (2006) zaproponowano z kolei rozwinięcie modelu programowania celowego dla zastosowania w planowaniu projektu z wykorzystaniem koncepcji rachunku kosztów docelowych¹. Rozwinięcie to, noszące nazwę metody KDPC, ma na celu określenie stosunku wpływu komponentu projektu (czynności, zadania, rezultatu) na ocenę projektu jako całości do relatywnego kosztu komponentu. Stosunek ten, wyrażony wskaźnikiem Z_i dla każdego komponentu, może przyjąć wartość idealną równą 1. Model programowania celowego posiada w tak zmodyfikowanym podejściu minimalizowaną funkcję celu, sumującą ważone odchylenia wskaźników Z_i dla wszystkich komponentów. Taka konstrukcja modelu decyzyjnego może być wykorzystana również dla potrzeb planowania czasu i zasobów w projekcie, co ilustruje poniższy przykład.

¹ Metoda rachunku kosztów docelowych opracowana została w latach 80. na wewnętrzne potrzeby koncernu Toyota. Jeden z najpełniejszych jej opisów zawiera książka Cooper, Slagmulder (1997).

Przykład 1

Przedsiębiorca planuje złożenie oferty na wykonanie usług konserwatorskich na rzecz czołowego krajowego producenta pewnego typu produktów. Nawiązanie współpracy z podmiotem o silnej pozycji rynkowej jest celem strategicznym, gdyż zdaniem przedsiębiorcy zapewnia regularność zleceń i gwarancję terminowego regulowania należności. Stąd też wszystkie działania w obrębie przygotowywanej oferty podporządkowane zostały nadrzędnemu celowi – pozyskaniu zlecenia, nawet za cenę realizacji „po kosztach”, nie osiągając żadnego zysku z wykonanego zadania. Zleceniodawca oczekuje od zainteresowanych przedstawienia ofert realizacji zadań ściśle określonych w specyfikacji zamówienia, zawierających wiążące propozycje: ceny (C), czasu wykonania (T) oraz udzielonego okresu gwarancji (W). Wymienione parametry pełnić będą w procedurze oceny funkcję kryteriów decyzyjnych z wagami odpowiednio $w_C = 20\%$, $w_T = 40\%$, $w_G = 40\%$. Syntetyczna ocena O_k k -tej oferty obliczana jest w sposób następujący:

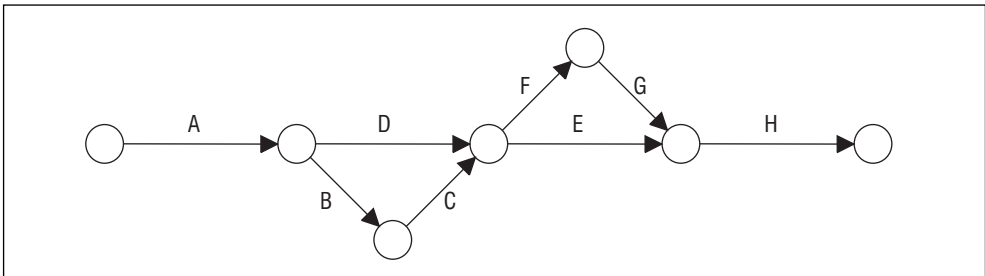
$$O_k(c_k, t_k, g_k) = w_C \frac{c_{\min}}{c_k} + w_T \frac{t_{\min}}{t_k} + w_G \frac{g_k}{g_{\max}}$$

gdzie wartości z indeksem *max* oznaczają najwyższą z wartości danego kryterium we wszystkich złożonych ofertach, wartości z indeksem *min* – najniższą z wartości danego kryterium we wszystkich złożonych ofertach, natomiast wartości z indeksem k są wartościami danego kryterium w analizowanej ofercie.

Zakres prac w przedmiotowym projekcie obejmuje wykonanie ośmiu czynności A, ..., H (rys. 1). Wykonanie zlecenia wymaga zaangażowania jednego lub dwóch wysoko wykwalifikowanych pracowników, o dużym doświadczeniu i odpowiedniej wiedzy. Jeden z pracowników (P1) zatrudnionych w przedsiębiorstwie jest w stanie podjąć się wykonania wszystkich czynności składających się na projekt. Drugi z kolei (P2) specjalizuje się w wykonywaniu czynności oznaczonych w literami B, C oraz E.

Aktualna sytuacja w przedsiębiorstwie (realizowane równoległe inne zlecenia) powoduje, że przygotowując ofertę, należy uwzględnić ograniczoną dostępność kluczo-

Rysunek 1. Sieć czynności dla projektu analizowanego w przykładzie 1



wych pracowników i ewentualne koszty poniesione w budżetach pozostałych projektów w wypadku konieczności ich przeniesienia na określony czas do realizacji analizowanego projektu. W szczególnym przypadku wykonanie wszystkich czynności zlecić można pracownikowi P1, jednakże w takiej sytuacji nie ma możliwości równoległego wykonywania czynności B, C i D oraz F, G i E. Podstawowe oszacowania przedsięwzięcia przedstawione zostały w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki projektu analizowanego w przykładzie 1

Czynność	Wszystkie czynności poprzedzające	Wymagany nakład pracy [r-g]	Pracownik	Koszt pracownika P1 [zł/h]	Koszt pracownika P2 [zł/h]
A	-	12	P1	30	0
B	A	8	P1 albo P2	30	45
C	A, B	4	P1 albo P2	35	50
D	A	12	P1	30	0
E	A, B, C, D	8	P1 albo P2	45	65
F	A, B, C, D	4	P1	30	0
G	A, B, C, D, F	4	P1	25	0
H	A, B, C, D, E, F, G	24	P1	30	0

Zróźnicowanie godzinowych kosztów pracy uwarunkowane jest faktem, że poszczególne pracownicy biorą udział również w pracach nad równoległym projektem. W związku z tym koszt pracy zasobu w przypadku niektórych czynności zostaje powiększony o koszty opóźnienia poniesione przy realizacji projektu równoległego. Długość okresu udzielonej gwarancji zależna jest od kwalifikacji pracowników wykonujących zadania wchodzące w zakres projektu. W omawianym przykładzie wielkość ta jest równa 9 miesięcy w przypadku gdy przynajmniej jedną z czynności B, C, E wykonuje pracownik P1 lub 12 miesięcy, gdy czynności te wykona specjalizujący się w ich zakresie pracownik P2.

Analizując sytuację na rynku, oszacowano również skrajne wartości ocenianych kryteriów w hipotetycznych ofertach konkurencyjnych (w analizie pominięto koszt materiałów eksploatacyjnych, które są dostarczane przez zleceniodawcę):

- najniższy możliwy koszt realizacji (przy najniższej stawce godzinowej dla wykwalifikowanego pracownika oraz założeniu zerowego zysku w najlepszej ofercie konkurencyjnej): $80(r - g) \times 20(\text{zł} / r - g) = 1600 \text{ zł}$,
- najkrótszy czas realizacji zlecenia, przy założeniu jednoczesnej pracy maksymalnie 2 pracowników w istniejących warunkach: czasy przejścia wszystkich ścieżek w grafie są równe $6 + 12 + 8 + 12 = 38$ godzin,
- najdłuższy okres gwarancji nie przekracza 12 miesięcy ze względu na konieczność zastosowania określonych materiałów eksploatacyjnych, które pod-

legają corocznej wymianie. W skrajnym przypadku wykonawca może w ogóle nie udzielić gwarancji. W analizowanym przypadku sytuacja taka jest jednak na tyle nieprawdopodobna, że nie została wzięta pod uwagę.

Ocena najkorzystniejszej oferty według powyższych oszacowań może wynieść co najwyżej:

$$O_i = 0,2 \frac{1600}{1600} + 0,4 \frac{38}{38} + 0,4 \frac{12}{12} = 0,2 + 0,4 + 0,4 = 1,0$$

Rozwiązanie zadania wymaga konstrukcji standardowego modelu z następującymi charakterystykami:

a) czas realizacji poszczególnych czynności:

$$t_A = 12h \times x_{1A}$$

$$t_B = 8h \times x_{1B} + 8h \times x_{2B}$$

$$t_C = 4h \times x_{1C} + 4h \times x_{2C}$$

$$t_D = 12h \times x_{1D}$$

$$t_E = 8h \times x_{1E} + 8h \times x_{2E}$$

$$t_F = 4h \times x_{1F}$$

$$t_G = 4h \times x_{1G}$$

$$t_H = 24h \times x_{1H}$$

b) koszt realizacji poszczególnych czynności:

$$c_A = 12h \times x_{1A} \times 30 \text{ zł/h}$$

$$c_B = 8h \times x_{1B} \times 30 \text{ zł/h} + 8h \times x_{2B} \times 45 \text{ zł/h}$$

$$c_C = 4h \times x_{1C} \times 35 \text{ zł/h} + 4h \times x_{2C} \times 50 \text{ zł/h}$$

$$c_D = 12h \times x_{1D} \times 30 \text{ zł/h}$$

$$c_E = 8h \times x_{1E} \times 45 \text{ zł/h} + 8h \times x_{2E} \times 65 \text{ zł/h}$$

$$c_F = 4h \times x_{1F} \times 30 \text{ zł/h}$$

$$c_G = 4h \times x_{1G} \times 25 \text{ zł/h}$$

$$c_H = 24h \times x_{1H} \times 30 \text{ zł/h}$$

c) okres gwarancji:

$$g_A = 12 \times x_{1A}$$

$$g_B = 9 \times x_{1B} + 12 \times x_{2B}$$

$$g_C = 9 \times x_{1C} + 12 \times x_{2C}$$

$$g_D = 12 \times x_{1D}$$

$$g_E = 9 \times x_{1E} + 12 \times x_{2E}$$

$$g_F = 12 \times x_{1F}$$

$$g_G = 12 \times x_{1G}$$

$$g_H = 12 \times x_{1H}$$

Wykorzystane w powyższym zapisie zmienne x_{1i} oraz x_{2i} przyjmują następujące wartości:

$$x_{1i} = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } i - \text{tą czynność wykonuje pracownik P1} \\ 0 & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases}$$

$$x_{2i} = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } i - \text{tą czynność wykonuje pracownik P2} \\ 0 & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases}$$

Zgodnie z powyższym można stwierdzić, że dla rozpatrywanego problemu zbiór rozwiązań dopuszczalnych składa się z ośmiu wariantów decyzyjnych. W tabelicy 2 określono wartości zmiennych decyzyjnych w kolejnych wariantach.

Tabela 2. Wartości zmiennych decyzyjnych dla wariantów decyzyjnych

Wariant	Wartości zmiennych decyzyjnych
1	$x_{1B} = 1$ $x_{2B} = 0$ $x_{1C} = 1$ $x_{2C} = 0$ $x_{1E} = 1$ $x_{2E} = 0$
2	$x_{1B} = 1$ $x_{2B} = 0$ $x_{1C} = 1$ $x_{2C} = 0$ $x_{1E} = 0$ $x_{2E} = 1$
3	$x_{1B} = 1$ $x_{2B} = 0$ $x_{1C} = 0$ $x_{2C} = 1$ $x_{1E} = 1$ $x_{2E} = 0$
4	$x_{1B} = 0$ $x_{2B} = 1$ $x_{1C} = 1$ $x_{2C} = 0$ $x_{1E} = 1$ $x_{2E} = 0$
5	$x_{1B} = 1$ $x_{2B} = 0$ $x_{1C} = 0$ $x_{2C} = 1$ $x_{1E} = 0$ $x_{2E} = 1$
6	$x_{1B} = 0$ $x_{2B} = 1$ $x_{1C} = 1$ $x_{2C} = 0$ $x_{1E} = 0$ $x_{2E} = 1$
7	$x_{1B} = 0$ $x_{2B} = 1$ $x_{1C} = 0$ $x_{2C} = 1$ $x_{1E} = 1$ $x_{2E} = 0$
8	$x_{1B} = 0$ $x_{2B} = 1$ $x_{1C} = 0$ $x_{2C} = 1$ $x_{1E} = 0$ $x_{2E} = 1$

Całkowity czas T realizacji projektu jest równy:

$$T = \begin{cases} t_A + t_B + t_C + t_D + t_E + t_F + t_G + t_H & \text{dla wariantu 1} \\ t_A + t_B + t_C + t_D + t_E + t_H & \text{dla wariantu 2} \\ t_A + t_B + t_D + t_E + t_F + t_G + t_H & \text{dla wariantu 3} \\ t_A + t_C + t_D + t_E + t_F + t_G + t_H & \text{dla wariantu 4} \\ t_A + t_B + t_D + t_E + t_H & \text{dla wariantu 5} \\ t_A + t_C + t_D + t_E + t_H & \text{dla wariantu 6} \\ t_A + t_D + t_E + t_F + t_G + t_H & \text{dla wariantu 7} \\ t_A + t_D + t_E + t_H & \text{dla wariantu 8} \end{cases}$$

Całkowity koszt realizacji wynosi:

$$C = \sum_i (c_{1i} + c_{2i})$$

Z kolei długość okresu gwarancji:

$$G = \min_i \{g_i\}$$

Dla potrzeb analizy metodą KDPC przyjęto równe wagi odchyłeń $w_i^+ = w_i^- = 0,5$ dla $i = 1, \dots, 3$.

W celu rozwiązania powyższego problemu skonstruowany model zapisano w arkuszu kalkulacyjnym Microsoft Excel. Minimalną wartość funkcji celu programowania celowego otrzymano dla wariantu 8. Wartości, jakie przyjmują kryteria dla tego wariantu, są następujące:

- czas realizacji: 56 godzin,
- koszt realizacji: 2740 zł,
- gwarancja: 12 miesięcy.

Analizując powyższe wyniki, stwierdzić można, że optymalnym rozwiązaniem zadania jest zaangażowanie pracownika P2 do wykonania wszystkich czynności, w których założono taką możliwość. Funkcja ważonej sumy odchyłeń osiąga dla takiego rozwiązania minimum równe 2,22, natomiast ocena oferty względem stosowanej przez zleceniodawcę funkcji oceny przyjmuje wartość 0,79. Oceny wszystkich wariantów dopuszczalnych względem tej funkcji przedstawiono w tabeli 3.

Przedstawione wyniki wskazują na to, że otrzymane rozwiązanie optymalne ze względu na wartość funkcji celu metody KDPC wskazuje jednocześnie na rozwiązanie optymalne względem funkcji O_k co oznacza, że decydent, dążąc do złożenia oferty najlepszej (w świetle oceny zamawiającego oraz dopuszczalnej przy aktualnych

Tabela 3. Oceny wariantów decyzyjnych

Wariant	Wartość funkcje celu zadania programowania celowego	Ocena wariantu wg funkcji stosowanej przez zleceniodawcę (O_i)
1	2,97	0,63
2	2,34	0,65
3	2,30	0,68
4	2,67	0,65
5	2,28	0,70
6	2,70	0,64
7	2,31	0,67
8	2,22	0,79

uwarunkowaniach wewnętrznych i zewnętrznych), powinien skonstruować ofertę na podstawie założenia realizacji wariantu 8.

Przypomnijmy, że ocena najlepszej możliwej oferty hipotetycznie może w danym przypadku przyjąć wartość 1,00. Zauważyć jednakże należy, że sytuacja taka może mieć miejsce jedynie, gdy najwyższe wartości wszystkich kryteriów zaproponowane zostaną w jednej ofercie. Otrzymany rezultat może jedynie stanowić wskazówkę dla przedsiębiorcy, w którego gestii jest podjęcie ostatecznej decyzji o ofercie.

Rozwiązanie uzyskane za pomocą metody KDPC pozwala na opracowanie ostatecznego harmonogramu projektu. Korzystając z metody ścieżki krytycznej uzyskujemy harmonogram przedstawiony w tabeli 4.

Tabela 4. Harmonogram realizacji projektu z przykładu 1

Czynność	Moment rozpoczęcia	Moment zakończenia
A	0	12
B	12	20
C	20	24
D	12	24
E	24	32
F	24	28
G	28	32
H	32	56

5. Harmonogramowanie projektów z wykorzystaniem podejścia interaktywnego

Przykład zaprezentowany w poprzedniej części pracy pokazuje, że problem konstrukcji harmonogramu projektu może być formułowany jako dyskretne zagadnienie wielokryterialne, w którym skończona liczba wariantów decyzyjnych oceniana jest ze względu na kilka kryteriów. Dotychczas przyjmowaliśmy, że interesuje nas pojedynczy

projekt, a czasy realizacji czynności podane są w postaci wartości rzeczywistych. W niniejszym rozdziale zajmujemy się problemem harmonogramowania w środowisku wieloprojektowym. Założymy zatem, że organizacja jednocześnie realizuje kilka projektów. Dodatkowo przyjmujemy również, że ze względu na unikalny charakter projektów nie jest możliwe podanie dokładnych czasów realizacji poszczególnych czynności. Będziemy jednak zakładać, że znane są rozkłady prawdopodobieństwa czasów realizacji poszczególnych czynności. Problem konstrukcji harmonogramu realizacji portfela projektów sformułujemy jako dyskretne zagadnienie wielokryterialnego wspomaganie decyzji w warunkach ryzyka, a do jego rozwiązania zaproponujemy metodę interaktywną opartą na analizie współczynników wymiany.

Rozważaną sytuację decyzyjną scharakteryzować można następująco:

1. Jednocześnie realizowanych jest kilka projektów.
2. Realizacja wszystkich projektów rozpoczyna się w tym samym momencie.
3. Realizacja każdego z projektów wymaga zaangażowania określonego zasobu.
4. Organizacja dysponuje dodatkowym zasobem, który może być wykorzystany przy realizacji wybranych czynności, przy czym koszt związany z jego wykorzystaniem jest wyższy niż koszt, jaki pociąga za sobą wykorzystanie zasobu standardowego.
5. Liczba możliwych sposobów alokacji dodatkowego zasobu jest na tyle niewielka, że możliwe jest porównanie każdej pary alternatywnych sposobów alokacji ze względu na każde z kryteriów.
6. Czasy realizacji czynności są zmiennymi losowymi o znanych rozkładach prawdopodobieństwa.
7. Decydent dąży do jednoczesnej realizacji następujących celów:
 - a) minimalizacja łącznego kosztu związanego z realizacją rozważanych projektów,
 - b) minimalizacja czasów realizacji poszczególnych projektów.
8. Na koszty realizacji każdego projektu składają się koszty administracyjne, proporcjonalne do czasu realizacji oraz koszty związane z wykorzystaniem poszczególnych zasobów.

Rozważany problem można przedstawić w postaci modelu Warianty – Kryteria – Oceny, dla którego zdefiniujemy zbiór wariantów decyzyjnych A , zbiór kryteriów X oraz zbiór ocen wariantów względem kryteriów E :

- $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$
- $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$
- $E = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1k} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{i1} & \dots & X_{ik} & \dots & X_{in} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{m1} & \dots & X_{mk} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix}$

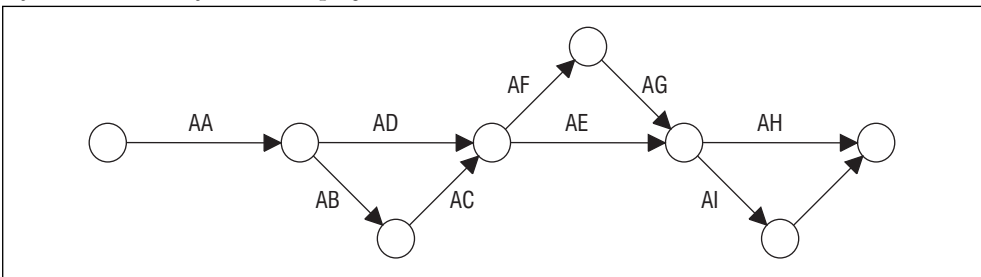
W analizowanym problemie na zbiór wariantów decyzyjnych składają się dopuszczalne sposoby alokacji dodatkowego zasobu. Z uwagi na fakt, że czasy realizacji czynności są zmiennymi losowymi, oceny wariantów względem kryteriów podane są w postaci rozkładów prawdopodobieństwa. W niniejszej pracy przyjmujemy, że są one uzyskiwane metodą symulacyjną.

Przykład 2

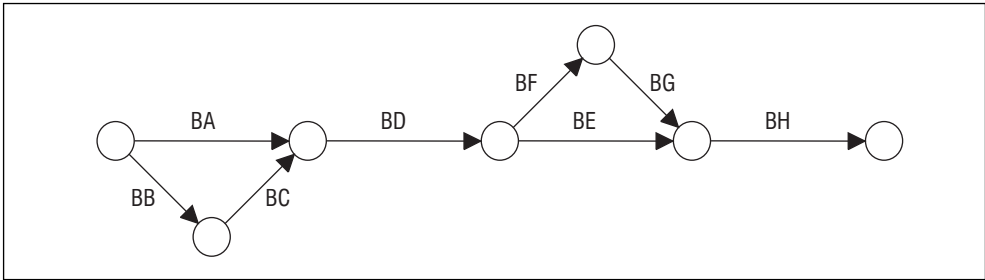
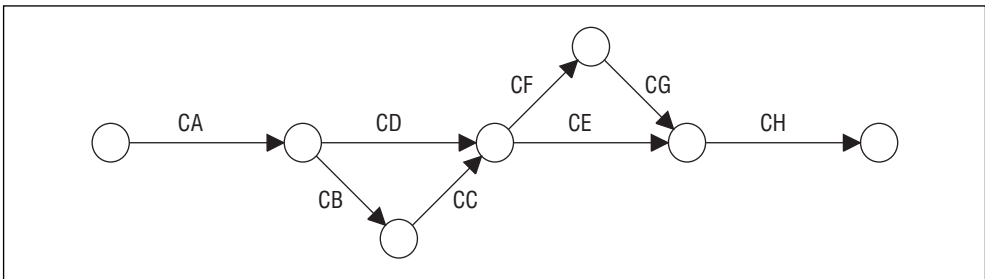
Dla zilustrowania istoty analizowanego problemu posłużymy się przykładem będącym pewnym rozszerzeniem przykładu rozważanego w poprzedniej części pracy. Przyjmujemy teraz, że zlecenie, którego ma się podjąć przedsiębiorca, obejmuje jednoczesną realizację trzech usług: A, B i C. Oferty zawierać winny wiążące propozycje ceny (C) oraz czasu wykonania usług.

Zakres prac każdego z analizowanych projektów obejmuje wykonanie kilku czasochłonnych czynności. Zależności między czynnościami przedstawiono na rys. 2-4.

Rysunek 2. Sieć czynności dla projektu A



Przedsiębiorca przewiduje, że realizacją projektu A zajmie się pracownik P1, projektu B pracownik P2, zaś realizacją projektu C pracownik P3. Koszt ich zatrudnienia oszacowano na 30 zł/godz. Dodatkowego wsparcia udzielić im może pracownik P4 wyspecjalizowany w pracach, które realizowane będą w ramach następujących czynności: AD, AE, AH, BA, BD, CD oraz CE. Analizując sieci czynności projektów, stwier-

Rysunek 3. Sieć czynności dla projektu B**Rysunek 4. Sieć czynności dla projektu C**

dzono, że zaangażowanie pracownika P4 do wykonania pewnych czynności uniemożliwia wykonywanie niektórych z pozostałych. Ustalono, że przydzielenie pracownikowi P4 czynności AD wyklucza możliwość wykonywania przez niego czynności BD, CD oraz CE. Dla pozostałych czynności zależności są następujące:

- przydzielenie czynności AE – brak możliwości wykonania czynności CE,
- przydzielenie czynności BD – brak możliwości wykonania czynności AD oraz CD,
- przydzielenie czynności CD – brak możliwości wykonania czynności AD oraz BD,
- przydzielenie czynności CE – brak możliwości wykonania czynności AE oraz AE.

Pracownik P4 jest wysokiej klasy specjalistą, a koszt jego zatrudnienia oszacowano na 45 zł za godzinę pracy. Podobnie jak poprzednio przyjmujemy, że ze względu na charakter pracy nie ma możliwości zaangażowania więcej niż jednego pracownika do realizacji pojedynczej czynności. Wiadomo również, że realizacja projektów pociąga za sobą koszty administracyjne, które ponoszone są w trakcie całego okresu realizacji i dla każdego projektu wynoszą 5 zł na godzinę.

Decydent nie jest w stanie precyzyjnie oszacować, ile czasu zajmie realizacja poszczególnych czynności. Uznano jednak, że czas ten opisać można za pomocą rozkła-

du trójkątnego. Dla każdej czynności określono najkrótszy możliwy czas realizacji (a), czas najbardziej prawdopodobny (b) oraz najdłuższy dopuszczalny czas realizacji (c).

Biorąc pod uwagę informację na temat czynności, które może realizować pracownik P4, wyznaczono zbiór wariantów decyzyjnych, na który składają się 44 rozwiązania (tabela 5).

Tabela 5. Lista wariantów decyzyjnych analizowanych w rozważanym problemie (czynności realizowane przez pracownika P4)

a_1 : żadna	a_{12} : AE, AH, BA	a_{23} : AH, BA	a_{34} : BA
a_2 : AD	a_{13} : AE, AH, BA, BD	a_{24} : AH, BA, BD	a_{35} : BA, BD
a_3 : AD, AE	a_{14} : AE, AH, BA, CD	a_{26} : AH, BA, CD	a_{36} : BA, CD
a_4 : AD, AE, AH	a_{15} : AE, AH, BD	a_{26} : AH, BA, BD, CE	a_{37} : BA, BD, CE
a_5 : AD, AE, AH, BA	a_{16} : AE, AH, CD	a_{27} : AH, BA, CD, CE	a_{38} : BA, CD, CE
a_6 : AD, AE, BA	a_{14} : AE, BA	a_{28} : AH, BA, CE	a_{39} : BA, CE
a_7 : AD, AH	a_{15} : AE, BA, BD	a_{29} : AH, BD	a_{40} : BD
a_8 : AD, AH, BA	a_{19} : AE, BA, CD	a_{30} : AH, CD	a_{41} : BD, CE
a_9 : AD, BA	a_{20} : AE, BD	a_{31} : AH, BD, CE	a_{42} : CD
a_{10} : AE	a_{21} : AE, CD	a_{32} : AH, CD, CE	a_{43} : CD, CE
a_{11} : AE, AH	a_{22} : AH	a_{33} : AH, CE	a_{44} : CE

Decydent zainteresowany jest uzyskaniem jak najniższych wartości czterech kryteriów:

- X_1 – koszt realizacji projektów,
- X_2 – czas realizacji projektu A,
- X_3 – czas realizacji projektu B,
- X_4 – czas realizacji projektu C.

Proponowana tutaj procedura rozwiązania problemu składa się z dwóch podstawowych faz. W pierwszej kolejności przeprowadzane jest badanie symulacyjne w celu pozyskania wiedzy na temat wpływu zaangażowania dodatkowego zasobu na wartości analizowanych kryteriów decyzyjnych. Uzyskane w ten sposób wyniki wykorzystywane są do skonstruowania rozkładów ocen wariantów decyzyjnych względem kryteriów. Faza druga procedury polega na wyznaczeniu rozwiązania końcowego problemu. W tym celu korzystamy z metody interaktywnej opartej na analizie współczynników wymiany (Nowak, 2010).

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych uzyskujemy ciągi wartości analizowanych kryteriów, które wykorzystamy do konstrukcji dyskretnych

rozkładów prawdopodobieństwa reprezentujących oceny analizowanego wariantu względem kryteriów.

W celu wyznaczenia rozwiązania końcowego analizowanego problemu wielokryterialnego proponujemy skorzystanie z interaktywnej procedury wspomaganie decyzji w warunkach ryzyka opartej na analizie wartości współczynników wymiany.

Współczynniki wymiany

Zanim przejdziemy do przedstawienia procedury, zdefiniujemy pojęcie współczynnika wymiany. Zaczniemy od problemu podejmowania decyzji w warunkach pewności. Rozważamy dwa warianty decyzyjne a_i oraz a_j , które oceniane są ze względu na dwa kryteria: X_p i X_q . Zakładamy, że oba kryteria oceniane są na skali ilorazowej zdefiniowanej w taki sposób, że wyższe wartości kryteriów są preferowane w stosunku do niższych. Przyjmijmy, że ocena wariantu a_i względem kryterium X_p jest gorsza niż odpowiednia ocena wariantu a_j ($X_{ip} < X_{jp}$), podczas gdy w przypadku kryterium X_q mamy do czynienia z sytuacją przeciwną ($X_{iq} > X_{jq}$). Współczynnik wymiany T_{ji}^{pq} (*trade-off*) wyraża jednostkowy przyrost wartości kryterium X_p w przeliczeniu na jednostkę spadku wartości kryterium X_q , gdy wariant a_i zostaje zastąpiony przez wariant a_j :

$$T_{ji}^{pq} = \frac{X_{jp} - X_{ip}}{X_{iq} - X_{jq}}$$

Przyjmijmy, że decydent zapoznając się z ocenami wariantu a_i uznał, że ocena wariantu a_i ze względu na kryterium X_p jest niezadowolająca, podczas gdy ocena ze względu na kryterium X_q może być pogorszona. W takim wypadku poszukiwać będziemy wariantów a_j , dla których $X_{jp} > X_{ip}$ oraz $X_{jq} \geq X_{iq}$ i wybierać ten z nich, który maksymalizuje wartość kryterium X_p . Jeżeli warianty takie nie istnieją, to za kolejną propozycję może być uznany wariant maksymalizujący wartość współczynnika T_{ji}^{pq} .

Z nieco bardziej złożoną sytuacją mamy do czynienia wówczas, gdy oceny wariantów względem kryteriów dane są w postaci rozkładów prawdopodobieństwa. W takim wypadku współczynnik wymiany opisany jest przez rozkład prawdopodobieństwa, który jest funkcją czterech rozkładów: X_{ip} , X_{iq} , X_{jp} , oraz X_{jq} . Sposób uzyskania rozkładów współczynników wymiany opisano w pracy Nowak (2010).

Reguły dominacji stochastycznej

Do porównania rozkładów ocen wariantów decyzyjnych oraz rozkładów prawdopodobieństwa współczynników wymiany wykorzystujemy reguły dominacji stochastycznej. Niech $F_{ip}(x)$ oznacza dystrybuantę zmiennej losowej X_{ip} . Relacje dominacji stochastycznej stopnia pierwszego oraz drugiego definiujemy w sposób następujący:

- FSD (*First Stochastic Dominance*):

X_{ip} dominuje X_{jp} w sensie dominacji stochastycznej stopnia pierwszego ($X_{ip} \succ_{\text{FSD}} X_{jp}$) jeżeli:

$$F_{ip}(x) \neq F_{jp}(x) \text{ oraz } F_{ip}(x) - F_{jp}(x) \leq 0 \text{ dla każdego } x \in \mathbb{R}.$$

- SSD (*Second Stochastic Dominance*)

X_{ip} dominuje X_{jp} w sensie dominacji stochastycznej stopnia drugiego ($X_{ip} \succ_{\text{SSD}} X_{jp}$) jeżeli:

$$F_{ip}(x) \neq F_{jp}(x) \text{ oraz } \int_{-\infty}^x (F_{ip}(y) - F_{jp}(y)) dy \leq 0 \text{ dla każdego } x \in \mathbb{R}.$$

W pierwszym etapie poszukiwać będziemy zbioru wariantów sprawnych. Wariant a_i nazwiemy wariantem sprawnym, jeżeli nie istnieje taki wariant a_j , którego rozkład ocen dominują rozkład ocen wariantu a_i w sensie relacji FSD lub SSD ze względu na wszystkie kryteria.

Procedura interaktywna

Rozwiązanie końcowe problemu wyznaczane jest przy wykorzystaniu procedury interaktywnej. W każdej iteracji decydentowi proponowane jest rozwiązanie próbne. Jeżeli uzna on, że spełnia ono jego oczekiwania, kończy procedurę. W przeciwnym wypadku decydent jest proszony o wskazanie kryterium, którego wartość powinna być poprawiona w pierwszej kolejności oraz uporządkowanie pozostałych kryteriów poczynając od tego, dla którego wartość jest najbardziej satysfakcjonująca, a kończąc na tym, którego ocenę uznaje za najmniej korzystną. Do wyznaczenia nowego rozwiązania wykorzystywana jest informacja na temat rozkładów współczynników wymiany.

Zanim zostanie zainicjowana procedura dialogu z decydentem, należy określić relacje dominacji stochastycznej zachodzące między rozkładami ocen wariantów decyzyjnych. Następnie wyznaczany jest zbiór rozwiązań sprawnych. Ze zbioru analizowanych wariantów usuwane są te, których rozkłady ocen ze względu na wszystkie kryteria są zdominowane przez odpowiednie rozkłady przynajmniej jednego innego wariantu. Informacje na temat relacji zachodzących między rozkładami ocen są również wykorzystywane do wyznaczenia pierwszego rozwiązania próbnego. Zastosujemy tu regułę minimaxową. Dla każdego wariantu a_i oraz każdego kryterium X_p wyznaczmy wartość d_{ip} wyrażającą liczbę wariantów, których rozkład ocen ze względu na kryterium X_p dominuje odpowiedni rozkład ocen wariantu a_i :

$$d_{ip} := \text{card}(D_{ip}), D_{ip} = \{a_j : X_{jp} \succ_{\text{FSD}} X_{ip} \vee X_{jp} \succ_{\text{SSD}} X_{ip}\}$$

Następnie dla każdego wariantu sprawnego a_i wyznaczamy wartość \bar{d}_i w sposób następujący:

$$\bar{d}_i := \max_{p \in \{1, \dots, n\}} \{d_{ip}\}$$

Ostatecznie za pierwsze rozwiązanie próbne przyjmujemy to, dla którego \bar{d}_i ma wartość minimalną.

Przed uruchomieniem procedury dialogowej decydent proszony jest o określenie parametrów rozkładów ocen, które powinny mu być prezentowane. Mogą to być np. wartość oczekiwana, odchylenie standardowe lub prawdopodobieństwo, że kryterium przyjmie wartość nie wyższą (nie niższą) niż zadana.

Niech $\mathbf{A}^{(l)}$ oznacza zbiór wariantów decyzyjnych rozważanych w iteracji l , zaś a_s wariant próbny proponowany decydentowi w tej iteracji. Pierwszy wariant próbny a_s wyznaczamy zgodnie z procedurą opisaną powyżej. Za l przyjmujemy 1, a do zbioru $\mathbf{A}^{(1)}$ włączamy wszystkie warianty sprawne. Interaktywne poszukiwanie rozwiązania końcowego problemu przebiega wg następującego scenariusza:

1. Decydentowi prezentowane jest rozwiązanie próbne a_s wraz z odpowiednimi wartościami parametrów rozkładów ocen; jeżeli decydent uznaje zaproponowane rozwiązanie za satysfakcjonujące, to procedura kończy się.
2. Decydent proszony jest o wskazanie tego kryterium, którego wartość powinna być poprawiona w pierwszej kolejności oraz uszeregowanie pozostałych kryteriów, poczynając od tego, którego wartość jest najbardziej satysfakcjonująca i może być pogorszona w pierwszej kolejności. Przez p oznaczymy numer kryterium, którego wartość powinna być poprawiona, zaś $\{q_1, q_2, \dots, q_{n-1}\}$ uporządkowane numery pozostałych kryteriów.
3. Wyznaczany jest zbiór wariantów, które będą analizowane w kolejnych iteracjach: ze zbioru wariantów usuwane są te, których rozkłady ocen ze względu na kryterium X_p są zdominowane w sensie relacji dominacji stochastycznej przez rozkład ocen wariantu a_s :

$$\mathbf{A}^{(l+1)} := \{a_i : a_i \in \mathbf{A}^{(l)}, a_i \neq a_s, \neg X_{sp} \succ_{\text{FSD}} X_{ip}, \neg X_{sp} \succ_{\text{SSD}} X_{ip}\}$$

4. Przyjmujemy $\mathbf{B} := \mathbf{A}^{(l+1)}$, $k := 1$.
5. Wyznaczamy rozkłady prawdopodobieństwa współczynników wymiany T_{is}^{pqk} dla i takich, że $a_i \in \mathbf{B}$.
6. Porównujemy rozkłady prawdopodobieństwa współczynników wymiany wyznaczone w kroku 5, korzystając z reguł dominacji stochastycznej. Jeżeli liczba niezdominowanych rozkładów jest równa 1, to wariant, dla którego został on wyznaczony, przyjmujemy za nowe rozwiązanie próbne a_s i przechodzimy do kroku 10.

7. Ze zbioru **B** usuwamy te warianty, dla których odpowiednie rozkłady współczynników wymiany są zdominowane przez rozkład co najmniej jednego innego współczynnika.
8. Jeżeli $k < n - 1$, to przyjmujemy $k := k + 1$ i przechodzimy do kroku 5.
9. Analizie poddano już relacje zachodzące między współczynnikami wymiany dla każdej pary kryteriów (X_p, X_{q_k}) , a liczba wariantów składających się na zbiór **B** jest wciąż większa od 1. Ze względu na fakt, że analiza relacji zachodzących między współczynnikami wymiany nie dała jednoznacznej rekomendacji dla wyboru nowego wariantu próbnego, analizie poddajemy relacje zachodzące między rozkładami ocen wariantów należących do zbioru **B** ze względu na kryterium X_p . Jako nowe rozwiązanie próbne a_s przyjmujemy dowolny z wariantów, których rozkład ocen nie jest zdominowany przez rozkład ocen żadnego innego wariantu ze zbioru **B**.
10. Przyjmujemy $l := l + 1$ i przechodzimy do kroku 1.

Wyznaczając nowe rozwiązanie próbne, staramy się znaleźć taki wariant, dla którego relacja między poprawą wartości kryterium X_p a pogorszeniem wartości pozostałych kryteriów jest najkorzystniejsza. Jeżeli analiza relacji zachodzących między rozkładami prawdopodobieństwa współczynników wymiany nie daje jednoznacznej rekomendacji, to spośród rozważanych wariantów jako nowe rozwiązanie próbne przyjmujemy ten, którego rozkład ocen ze względu na kryterium X_p nie jest zdominowany przez rozkład ocen żadnego innego wariantu.

Przykład dialogu z decydem

Rozważamy przykład opisany powyżej. Dla każdego z 44 wariantów decyzyjnych przeprowadzono badanie symulacyjne. Uzyskane wyniki wykorzystano do wyznaczenia rozkładów ocen wariantów decyzyjnych ze względu na kryteria $X_1 - X_4$. Następnie wyznaczono zbiór rozwiązań sprawnych, na który składało się 28 wariantów. Warianty te tworzą zbiór $\mathbf{A}^{(1)}$:

$$\mathbf{A}^{(1)} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{14}, a_{16}, a_{17}, a_{19}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{25}, a_{27}, a_{30}, a_{32}, a_{34}, a_{36}, a_{38}, a_{42}, a_{43}\}$$

Decydent określił, że w fazie dialogu powinny być prezentowane wartości oczekiwane rozkładów ocen wariantów ze względu na wszystkie kryteria.

Jako rozwiązanie próbne przyjmujemy wariant a_3 , zgodnie z którym pracownik P4 powinien zostać przydzielony do wykonania czynności AD oraz AE. Decydentowi prezentowane są wartości oczekiwane rozkładów ocen wariantu a_3 oraz najniższe wartości oczekiwane rozkładów ocen uzyskane dla wariantów należących do zbioru $\mathbf{A}^{(1)}$ (tabela 6).

Tabela 6. Informacje prezentowane decydentowi

	Wartości oczekiwane rozkładów ocen			
	X_1	X_2	X_3	X_4
a_3	8635	78	66	77
min	8435	59	55	54

Decydent jest proszony o wyrażenie opinii, czy oceny zaproponowanego wariantu są satysfakcjonujące. Ponieważ jego odpowiedź jest negatywna, więc jest on z kolei proszony o wskazanie tego kryterium, które dla wariantu a_3 przyjęło wartość najmniej satysfakcjonującą. Decydent wskazuje kryterium X_4 . Następnie prosimy o uporządkowanie pozostałych kryteriów, poczynając od tego, które może być pogorszone w pierwszej kolejności. Decydent podaje następujący porządek kryteriów: $\{X_3, X_1, X_2\}$. Wyznaczany jest zbiór wariantów, które będą rozważane w dalszej fazie procedury. Z uwagi na fakt, że rozkład ocen wariantu a_3 ze względu na kryterium X_4 nie dominuje rozkładu żadnego innego wariantu ze zbioru $\mathbf{A}^{(1)}$, więc do zbioru $\mathbf{A}^{(2)}$ zaliczymy wszystkie warianty ze zbioru $\mathbf{A}^{(1)}$ z wyjątkiem wariantu a_3 . Następnie poszukujemy kolejnego rozwiązania próbnego. W pierwszej kolejności generowane są rozkłady prawdopodobieństwa współczynników wymiany dla pary kryteriów (X_4, X_3) . Rozkłady te są następnie porównywane z wykorzystaniem reguł dominacji stochastycznej. Z uwagi na fakt, że rozkład prawdopodobieństwa współczynnika T_{423}^{41} dominuje rozkłady prawdopodobieństwa pozostałych, wariant a_{42} przyjmowany jest jako kolejne rozwiązanie próbne. Zgodnie z nim pracownik P4 powinien wykonać czynność CD. Procedura powinna być kontynuowana do momentu wyznaczenia takiego rozwiązania, które decydent uzna za satysfakcjonujące. Po jego uzyskaniu można przejść do wyznaczenia harmonogramu projektu postępując podobnie, jak w przykładzie 1 przyjmując, że czas realizacji każdej czynności jest równy wartości oczekiwanej odpowiedniego rozkładu prawdopodobieństwa.

6. Podsumowanie

Działalność większości współczesnych przedsiębiorstw, a także wielu organizacji o charakterze niekomercyjnym wymaga podejmowania przedsięwzięć, które nie były nigdy wcześniej przez nie realizowane w takim samym celu, zakresie, czasie, budżecie i ograniczeniach środowiskowych. Zgodnie z powszechnie akceptowaną definicją przedsięwzięcia takie nazywane są projektami. Wzrost liczby realizowanych projektów sprawia, że coraz szerszą akceptację znajduje koncepcja „zarządzania przez projekty”. Po projektowy styl zarządzania sięgają obecnie zarówno duże organizacje gospodarcze, jak też małe i średnie firmy.

W pracy przedstawiliśmy możliwości wykorzystania metodologii wielokryterialnej w procesie konstrukcji harmonogramów projektów rozumianych jako takie plany realizacji, które uwzględniają ograniczoność zasobów pozostających w dyspozycji wykonawcy. Pierwsza z zaprezentowanych metod wykorzystuje podejście proponowane w programowaniu celowym, druga formułuje problem jako zagadnienie dyskretnego podejmowania decyzji w warunkach ryzyka i rozwiązuje go przy wykorzystaniu podejścia interaktywnego.

Obie procedury zaprojektowane zostały dla problemów ze stosunkowo niewielkim zbiorem wariantów decyzyjnych (nie więcej niż kilkadziesiąt wariantów). W rzeczywistości ich liczba może być bardzo duża. W takim wypadku możemy spróbować wykorzystać procedurę dwufazową. W pierwszej kolejności analizie poddać możemy niewielki podzbiór odpowiednio zróżnicowanych wariantów. Przeprowadzając dialog z decydentem, staramy się wówczas zidentyfikować obszar dalszych poszukiwań. W fazie drugiej koncentrujemy się już na przeszukaniu tego najbardziej obiecującego obszaru przestrzeni rozwiązań. Zagadnienia tego typu będą przedmiotem dalszych analiz autorów niniejszej pracy.

Bibliografia

- Arikan, F., Güngör, Z. 2001. *An application of fuzzy goal programming to a multiobjective project network problem*. „Fuzzy Sets and Systems” 119: 49-58.
- Benka, E., Matula, M. 1967. *Metoda PERT w projektowaniu i budowie kopalni odkrywkowych*. Zeszyty Problemowe DBPG nr 41, Wrocław.
- Błaszczuk, T. 2003. *Zastosowanie rachunku kosztów docelowych w planowaniu projektów*. „Badania Operacyjne” i „Decyzje” nr 3/2003, 5-18.
- Błaszczuk, T. 2006. *Metody wielokryterialne w planowaniu projektu*. Praca doktorska. Akademia Ekonomiczna w Katowicach.
- Błaszczuk, T., Nowak, M. 2009. *The time-cost trade-off analysis in construction project using computer simulation and interactive procedure*. „Technological and Economic Development of Economy, Baltic Journal on Sustainability” 15/4: 523-539.
- Błaszczuk, T., Trzaskalik, T. 2007. *Wielokryterialne planowanie projektów*. Decyzje 7: 63-82.
- Charnes, A., Cooper, W.W. 1961. *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*. John Wiley and Sons, Nowy Jork.
- Cooper, R., Slagmulder, R. 1997. *Target costing and value engineering*. Productivity Press, The IMA Foundation For Applied Research, Inc., Portland.
- Czech, A. 2004. *Adamiecki, Hauswald, Rothert. W 100-lecie nauki organizacji i zarządzania w Polsce*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach.
- Dey, P. K., Tabucanon, M. T., Ongulana, S. O. 1996. *Petroleum pipeline construction planning: a conceptual framework*. „International Journal of Project Management” 14: 231-240.

- Gaspars-Wieloch, H. 2009. *Wyznaczanie wariantów czasowo-kosztowych realizacji projektu*, w: Trzaskalik T. (red.): *Badania operacyjne w planowaniu projektów*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach.
- Gasparski, W. 1999. *Prakseologia*. Wydawnictwo Warszawskiej Szkoły Zarządzania.
- Gantt, H.L. 1903. *A graphical daily balance in manufacture*. „ASME Transactions” 24: 1322-1336.
- Ignasiak, E. 2001 (red.). *Badania Operacyjne*. Wydanie trzecie zmienione, PWE, Warszawa.
- Jaworski, K.M. 1999. *Metodologia projektowania realizacji budowy*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kerzner, H. 2006. *Project Management. A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling*. 9th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Korhonen, P. 2005. *Interactive methods*. W: Figueira J., Greco S., Ehrgott M. (eds.) *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer, Berlin, s. 641-665.
- Krawczyk, S. 1990. *Matematyczna analiza sytuacji decyzyjnych*. PWE, Warszawa.
- Lee, J.W., Kim, S.H. 2001. *An integrated approach for interdependent information system project selection*. „International Journal of Project Management” 19: 111-118.
- Nowak, M. 2010. *Trade-Off Analysis in Discrete Decision Making Problems Under Risk*. W: Jones D., Tamiz M., Ries J. (eds.): *New Developments in Multiple Objective and Goal Programming*. Springer, Berlin, s. 103-115.
- Nowak, M., Błaszczuk, T., Fiala, P., Jablonsky, J. 2009. *Planowanie projektów w środowisku wieloprojektowym z wykorzystaniem symulacji komputerowej i podejścia interaktywnego*. W: Trzaskalik T. (red.): *Badania operacyjne w planowaniu projektów*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach, s. 71-94.
- Radasch, D.K., Kwak, N.K. 1998. *An integrated mathematical programming model for offset planning*. „Computers and Operations Research” 25: 1069-1083.
- Rowiński, L. 1992. *Organizacja, zarządzanie i ekonomika przedsiębiorstw budowlanych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Szyjewski, Z. 2001. *Zarządzanie projektami informatycznymi*. Agencja Wydawnicza PLACET, Warszawa.
- Tavares, L.V. 2002. *A review of the contribution of Operational Research to Project Management*. *European Journal of Operational Research* 136: 1-18.
- Taylor, F.W. 1903. *Shop Management*. „ASME Transactions” 24: 1337-1480.
- Trzaskalik, T. 2003. *Wprowadzenie do badań operacyjnych z komputerem*. PWE, Warszawa.
- von Bertalanffy, L. 1984. *Ogólna teoria systemów. Podstawy, rozwój, zastosowania*. PWN, Warszawa.
- Wilson, J.M. 2003. *Gantt charts: A centenary appreciation*. „European Journal of Operational Research” 149: 430-437.