

Andrzej M. Skulimowski

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

METODY PROGNOZOWANIA DYNAMICZNYCH RANKINGÓW PRIORYTETÓW TECHNOLOGICZNYCH

Wprowadzenie

W niniejszym opracowaniu przedstawimy podstawy teoretyczne oraz wynikające z nich praktyczne algorytmy rozwiązywania istotnej klasy wielokryterialnych problemów decyzyjnych, występujących przy podejmowaniu decyzji inwestycyjnych w oparciu o rankingi celów i priorytetów. Metodyka określania priorytetów społecznych, gospodarczych, ekologicznych i technologicznych w kontekście prognoz i scenariuszy uzyskanych jako rezultaty badań foresightowych wymaga zdefiniowania (najczęściej w kontekście celów średnio-terminowych) wskaźników ilościowych oraz funkcji estymujących korzyści społeczne, gospodarcze i ekologiczne. Następnie konieczne jest uwzględnienie aktualnych warunków ekonomicznych wdrażania strategii związanych z rozwojem technologicznym i wynikających z nich ograniczeń dla parametrów finansowych i ekonomicznych w rozpatrywanym horyzoncie czasowym prognozy. Takie podejście prowadzi do sformułowania wielokryterialnego zagadnienia decyzyjnego jako problemu optymalizacji wektorowej ze zbiorem kryteriów opisujących społeczne, ekonomiczne, ekologiczne, jak również technologiczne preferencje interesariuszy danego przedsięwzięcia [18]. Równolegle formułowany jest pomocniczy problem wielokryterialnego uszeregowania obiektów [19] ze względu na powiązany z powyższymi preferencjami zbiór kryteriów. Zakładamy przy tym, że wyniki optymalizacji rozwiązania problemu nadrzędnego są zależne od wyboru portfela obiektów, takich jak projekty technologiczne czy infrastrukturalne, na podstawie tego uszeregowania, [7; 10]. W szczególności, wybór priorytetowych technologii proekologicznych, których wdrażanie w przedsiębiorstwach wspierane jest ze środków Programów Operacyjnych, ma bezpośredni wpływ na wartości kryteriów ekologicznych, ekonomicznych i społecznych charakteryzujących region, w którym realizowane są te przedsięwzięcia.

Nawiązując do struktury problemu i terminologii stosowanej dalej, dla analizowanej tu klasy zastosowań decydentami są z reguły centralne urzędy branżowe lub władze regionu, lista priorytetów zawarta jest w narodowej lub odpowiednio – regionalnej strategii rozwoju, zgodnej z Narodową Strategią Spójności, a rankingi priorytetów, technologii kluczowych, projektów technologicznych i infrastrukturalnych tworzone są przez ekspertów i zatwierdzone przez decydentów. Natomiast interesariuszem jest ogół społeczeństwa rozważanego terytorium reprezentowany przez instytucje i organizacje nadzorujące procesy alokacji wsparcia. Szczególnie ważna jest umiejętność zastosowania metod wielokryterialnych w procesach decyzyjnych związanych z prognozowaniem efektywnego rozdziału środków finansowych na poszczególne obszary polityki naukowo-badawczej lub rozwojowej.

Przypomnijmy, że problem optymalizacji wielokryterialnej może być sformułowany następująco

$$(F: U \rightarrow E) \rightarrow \min(\theta) \quad (1)$$

gdzie U i E to odpowiednio przestrzeń decyzji i przestrzeń kryteriów tj. zbiór, w którym wartości przyjmuje funkcja kryterialna F , $F = (F_1, \dots, F_n)$ jest wektorową funkcją celu, θ jest domkniętym i wypukłym stożkiem, wprowadzającym częściowy porządek w E [5; 13]. Porządek ten będzie oznaczany jako \succ_{θ} , z definicji

$$x \succ_{\theta} y \Leftrightarrow y - x \in \theta$$

W najczęstszym przypadku, analizowanym również i w tym opracowaniu, $E = \mathbb{R}^n$, a θ jest dodatnim stożkiem \mathbb{R}_+^n , lub θ jest izomorficzny z \mathbb{R}_+^n i $\eta(\mathbb{R}_+^n) \subset \theta$ dla pewnej izometrii η . Ten ostatni warunek gwarantuje istnienie takich kombinacji liniowych G_1, \dots, G_n kryteriów (F_1, \dots, F_n) , że problem (1) jest równoważny problemowi $(G: U \rightarrow E) \rightarrow \min$, gdzie minimum określone jest przez naturalny stożek \mathbb{R}_+^n , któremu odpowiada naturalny porządek częściowy „ \leq ” wyznaczony przez porównanie kolejnych współrzędnych wektorów x i y , tj.

$$x \leq y \Leftrightarrow x_i \leq y_i \text{ dla } i=1, \dots, n$$

Zbiór punktów niezdominowanych w problemie (1) będzie oznaczany jako $P(U, F, \theta)$, z definicji $x \in P(U, F, \theta)$ wtedy i tylko wtedy, gdy

$$\forall y \in U [y \leq x \Rightarrow x = y]$$

W pewnych sytuacjach problem znalezienia rankingu elementów zbioru X_0 może zostać sformułowany jako sekwencja wielokryterialnych problemów decyzyjnych typu (1)

$$(F: X_k \rightarrow \mathbb{R}^n) \rightarrow \min(\theta_k) \quad (2)$$

$$(\varphi_k: P(X_k, F_k, \theta_k) \rightarrow \mathbb{R}) \rightarrow \min \quad (3)$$

$$X_k := X_{k-1} \setminus \operatorname{argmin} \{(\varphi_{k-1} \circ F_{k-1})(X_{k-1})\} \quad (4)$$

dla $k = 1, \dots, K - 1$, gdzie (3) jest problemem optymalizacji wielokryterialnej typu (1), $X_0 := X$ jest zbiorem alternatyw o liczności większej od K , $F_0 := F = (f_1, \dots, f_n), \dots, F_k = (f_{1,k}, \dots, f_{n,k})$ są wektorami funkcji kryterialnych dla k -tego problemu, $k = 1, \dots, K$, a θ_k jest stożkiem definiującym porządek częściowy w \mathbb{R}^n . Każdy z problemów (2)-(3) opisuje preferencje interesariuszy, jak również stopień osiągnięcia celów osób podejmujących decyzje.

Problem szeregowania spełniający warunek (4) będzie nazywany bezkontekstowym. W problemach portfelowych tego typu wybór jednego z obiektów do portfela jest niezależny od wyboru dowolnego z pozostałych obiektów [17]. Dla zapewnienia obiektywności tworzenia rankingów założymy dodatkowo, że

$$\forall k \in \{1, \dots, K\}, F_k := F, \varphi_k := \varphi \text{ na } X_0 \text{ i } \theta_k = \theta$$

Gdy U jest zbiorem ocenianych technologii, wtedy rozwiązaniem problemu (1) (a właściwie ciągu takich problemów) może być ranking priorytetów technologicznych, które mogą wchodzić w skład różnych strategii. Aby ranking priorytetów uczynić możliwym do wdrożenia praktycznego, należy precyzyjnie zdefiniować zależność pomiędzy metodyką rankingów a celami praktycznymi. Tak zdefiniowane priorytety są zwykle stosowane w celu przydziału zasobów dla różnych przedsięwzięć badawczych lub wdrożeniowych. Innym zastosowaniem analizy priorytetów jest wykorzystanie przez decydentów rankingów do wskazania hierarchii czasowej tak, aby cele scharakteryzowane przez priorytety o wyższym rankingów były realizowane wcześniej niż te o niższym priorytecie.

Wadą dotychczas stosowanych podejść jest statyczny model priorytetów, w którym początkowe rangi obiektów, np. technologii kluczowych zostają określone dla całego okresu wdrażania, przy czym brakuje zobiektywizowanego mechanizmu ich modyfikacji w zależności od zmieniającej się sytuacji zewnętrznej (gospodarczej, ekologicznej, czy socjalnej) lub w przypadku wcześniejszego od zakładanego osiągnięcia określonych celów strategicznych. Problemy wynikające z uwzględnienia dynamiki przy określaniu priorytetów rozważane były także w [1; 20], jednakże bez wzięcia pod uwagę możliwości ewolucji raz ustalonych rankingów w wyniku zmieniających się preferencji i okoliczności. W praktyce nowe priorytety technologiczne i odpowiadające im strategie wdrożeniowe redefiniowane są najczęściej po zmianie decydentów. Wtedy też

tworzone są nowe prognozy i scenariusze, często bez powiązania z wcześniejszymi badaniami. Ponadto istniejące modele przyszłości stosowane w procesach wspomagania decyzji technologicznych nie uwzględniają na ogół w wystarczający sposób powiązań pomiędzy celami dotąd osiągniętymi, a tymi, które mają być osiągnięte w przyszłości, wskutek czego rozbieżności pomiędzy prognozami a rzeczywistością często zaskakują decydentów.

Innowacyjność metody dynamicznych rankingów priorytetów przedstawionej w dalszej części niniejszego opracowania polega także na tym, że wzajemne wpływy prognozy scenariuszowej oraz czynników zewnętrznych wpływających na przyszłe scenariusze są analizowane w jednym wspólnym modelu. Wzajemne zależności między zdarzeniami mogą być modelowane jako sterowany system zdarzeń dyskretnych, dzięki czemu sieć przyszłych zdarzeń i przyczynowych relacji między nimi można przedstawić jako graf o zmiennej strukturze zależnej od czasu. Wierzchołki grafu interpretowane są jako stany rozważanych obiektów, parametryzowane przez wartości optymalizowanych kryteriów.

1. Dynamiczne rankingi a foresight

Metodyka oparta na wynikach badań foresightowych przy określaniu obiektywnego algorytmu przydziału zasobów jest szeroko akceptowanym podejściem wspierającym podejmowanie strategicznych decyzji na różnych szczeblach [15; 18]. Jednym z możliwych celów prognozowania scenariuszowego jest utworzenie rankingu celów strategicznych i zarekomendowanie ich osobom podejmującym decyzje. Horyzont czasowy foresightu jest relatywnie długi i zawiera się zazwyczaj w przedziale 15-50 lat [18]. Zakładamy, iż priorytety technologiczne są rezultatem prognoz ekonomiczno-finansowych, społecznych i technologicznych i że przedstawione są one w formie rekomendacji i rankingów. Należy zaznaczyć, iż odmiennie jak to jest w przypadku indywidualnych rankingów projektów priorytet technologiczny nie jest jednoznacznie zdefiniowanym terminem, zatem pojęcie to musi zostać powiązane z planem konkretnych działań wdrożeniowych, ekonomicznych lub ekologicznych.

Powyższe ustalenia prowadzą do sformułowania hierarchicznego wielokryterialnego problemu decyzyjnego, który uwzględnia wyniki prognoz i badań foresightowych za pomocą optymalizacji kryteriów opisujących społeczne, ekonomiczne, ekologiczne i technologiczne preferencje zarówno interesariuszy, jak i decydentów oraz stopień osiągnięcia celów strategicznych zatwierdzonych przez władze legislacyjne i będących elementem polityki naukowo badawczej, rozwojowej lub regionalnej.

Hierarchiczna procedura przydziału funduszy na wdrożenie priorytetów technologicznych może zostać scharakteryzowana przez następujące reguły:

1. Na najwyższym poziomie decyzyjnym dynamiczne rankingi są używane do szeregowania obszarów polityki.

2. Na niższych poziomach szeregowane są kolejno cele pośrednie i szczegółowe, a następnie technologie i projekty technologiczne, na które przydzielane są środki.

3. Uporządkowanie na poziomie niższym musi uwzględniać rankingi z wyższego poziomu, dodatkowe charakterystyki projektów (każdy projekt może być powiązane z kilkoma obszarami polityki) i wielkość funduszy przeznaczonych do przydziału na projekty (zbyt duże projekty mogą nie otrzymać finansowania pomimo wyższej pozycji w rankingu od projektów niżej ocenianych, lecz mieszczących się w limicie środków do podziału).

4. Każdy przydział środków traktowany jest jako funkcja czasu (np. kwartalny plan finansowania w okresie realizacji projektu) i zewnętrznych zmiennych logicznych, które reprezentują zmiany w rankingach wyższego poziomu i stanów zewnętrznego otoczenia politycznego, ekonomicznego, ekologicznego, społecznego i technologicznego (PEEST). Dodatkowo alokacja środków może być uzależniona od stopnia osiągnięcia celów strategicznych określonych na wyższych szczeblach podejmowania decyzji.

Charakterystyczną cechą przedstawionego podejścia, które należy do metodyki foresightu, jest adaptacyjne stosowanie scenariuszy do ustalenia przyszłych rankingów. Mianowicie, opierając się na estymacji prawdopodobieństw zdarzeń wpływających na spełnienie się scenariuszy w chwili t_0 , możemy wyliczyć prawdopodobieństwo poszczególnych scenariuszy, a poprzez zależność rang od wskaźników je opisujących, traktowanych jako kryteria, możliwa jest budowa wariantowych prognoz także i przyszłych rankingów. Pozwala to uwzględnić w planowaniu przydziału funduszy więcej wiedzy ex-ante niż w zazwyczaj stosowanych, statycznych podejściach, ograniczających się do analizy potrzeb w chwili początkowej.

Poza usprawnieniem finansowania projektów rozdzielanego w drodze konkursów, dynamiczne rankingi mogą być pomocne przy określaniu optymalnej struktury organizacyjnej i charakterystyk zasobów ludzkich instytucji wdrażających takie projekty. Prognoza kształtowania się przyszłych priorytetów może być też wykorzystana do planowania potrzeb budżetowych w przyszłości i działań, które należy podjąć w odpowiedzi na przewidywane zdarzenia zewnętrzne niezależne od decydenta. Rankingi obiektów wyższego poziomu mogą służyć do konstrukcji rankingów na niższych (operacyjnych) poziomach decyzyjnych, np. cele unijnej polityki ekologicznej czy preferowane kierunki ekspansji inwestycyjnej wpływają na rankingi technologii w przemyśle che-

micznym, które z kolei są uwzględniane w regionalne programach operacyjnych przy rozdziale środków na projekty technologiczne przedsiębiorstw, obszary akcji prewencyjnych, strategie inwestycji komunalnych itp.

Przykład zastosowania opisanego tu podejścia do konstrukcji dynamicznych rankingów polityki regionalnej jest przedstawiony niżej.

2. Opis metody dynamicznych rankingów (DPR)

Zależności pomiędzy zdarzeniami zachodzącymi w rozpatrywanym systemie, sterowaniami wewnętrznymi, wpływem decyzji zewnętrznych i zdarzeń losowych mogą być modelowane jako sterowany automat deterministyczny, nazywany systemem zdarzeń dyskretnych [11]. Pozwalają tym samym na utworzenie modelu sieci przyszłych zdarzeń i relacji między nimi jako grafu o strukturze zależnej od czasu, gdzie wierzchołki interpretowane są jako stany obiektów, a krawędzie jako sterowania (czyli akcje podejmowane przez decydentów), z parametrami odpowiadającymi wartościom optymalizowanych kryteriów.

Przypomnijmy [11], że system zdarzeń dyskretnych może być przedstawiony jako układ

$$P = (Q, V, \delta, Q_0, Q_m) \quad (5)$$

gdzie: Q – skończony zbiór stanów systemu, V – zbiór dopuszczalnych operacji na stanach systemu (sterowań), $\delta: V \times Q \rightarrow Q$ – funkcja przejścia definiująca wyniki operacji na stanach, Q_0 – zbiór stanów początkowych analizowanych procesów, Q_m – zbiór (potencjalnych) stanów końcowych. Para stanów $e:=(q_1, q_2)$, takich, że $q_2 = \delta(v, q_1)$ będzie nazywana zdarzeniem, co oznacza, że do stanu q_2 przechodzimy ze stanu q_1 na skutek wystąpienia zdarzenia (operacji) v ze zbioru V . Zbiór wszystkich dopuszczalnych zdarzeń w systemie (5) oznaczymy przez E . Zakładamy, że operacje ze zbioru V są albo konsekwencjami decyzji podejmowanych przez decydenta odpowiadającego za funkcjonowanie systemu (5), działaniami zewnętrznych decydentów nad Q , albo że mogą pojawiać się spontanicznie, jako skutki losowych procesów. W pierwszym przypadku, operacje $v \in V$ będą nazywane sterowaniami. Zakładamy ponadto, że istnieje zbiór $X(Q)$, zawierający ilościowe bądź porządkowe charakterystyki zbioru stanów Q , który może być deterministyczny, stochastyczny, rozmyty itp. Podobnie, do zdarzeń może być przypisany zbiór kryteriów $G = (G_1, \dots, G_k): E \rightarrow \mathbb{R}^k$. Jedna ze współrzędnych G może (ale nie musi) być interpretowana jako czas.

Systemy typu (5) mogą być bezpośrednio powiązane z obiektami będącymi przedmiotem badań foresightowych. W tym celu zdefiniujemy scenariusze zdarzeń w systemie (5).

Definicja 1

Scenariuszem elementarnym s nazywamy sekwencję zdarzeń (e_1, \dots, e_p) , takich że jeśli $e_i = (q_i, q_{i+1})$, to $e_{i+1} = (q_{i+1}, q_{i+2})$.

Scenariusz elementarny jest zatem trajektorią systemu (5), określoną przez pewien ciąg decyzji i zdarzeń losowych v_1, \dots, v_p . Należy przy tym pamiętać, że dowolna sekwencja stanów nie musi być trajektorią systemu (5), gdyż poszczególne pary kolejnych stanów nie muszą tworzyć zdarzeń.

Zauważmy, że przez scenariusz ekspert foresightu rozumie zazwyczaj pewne uśrednione charakterystyki przyszłych procesów, zależne od określonych przyczyn. W badaniu foresightowym scenariuszy takich definiuje się z reguły od dwóch do pięciu, jest ich zatem znacznie mniej niż scenariuszy elementarnych w typowym systemie zdarzeń dyskretnych. Dla zachowania zgodności z powyższą przyjętą powszechnie interpretacją scenariusza foresightowego, można przeprowadzić klasteryzację scenariuszy elementarnych, która w przedstawionym tu podejściu polega na zdefiniowaniu odległości pomiędzy scenariuszami elementarnymi, a następnie na tworzeniu klastrow, przy czym grupowanie odbywa się według dodatkowych zasad spójności grupy scenariuszy elementarnych. Tak utworzone scenariusze są zazwyczaj identyfikowane przez średnie wartości charakterystyk ilościowych ze zbioru $X(Q)$ w określonym zbiorze momentów w przeszłości.

Systemy zdarzeń dyskretnych mogą określać ewolucję systemu zdarzeń w otoczeniu PEEST instytucji, która tworzy lub wdraża strategię technologiczną. Model takiego systemu, a zwłaszcza związki przyczynowo-skutkowe i sprzężenia zwrotne, stanowi narzędzie do konstruowania scenariuszy elementarnych, które pojawiają się jako wyróżnione trajektorie systemu (5). W konsekwencji, używając aparatu metodologicznego systemów zdarzeń dyskretnych, do generowania niezdeterminowanych scenariuszy, strategii lub polityki można zastosować uogólnienie wielokryterialnego algorytmu wielokryterialnej najkrótszej ścieżki dla grafów o zmiennej strukturze, zależnej od sposobu dojścia do określonego wierzchołka (stanu). Idee rozwiązania tej klasy problemów pochodzą bezpośrednio z zasady programowania dynamicznego Bellmana [4; 6; 8]. Możemy użyć tej metody do uporządkowania stanów obiektu dla każdej chwili końcowej procesu modelowania, biorąc pod uwagę ilościowe charakterystyki wyznaczone przez algorytm najkrótszej ścieżki wielokryterialnej. Przypisując dodatkowe prawdopodobieństwa do każdego rozważanego

zdarzenia zewnętrznego, możemy wyprowadzić oczekiwany ranking priorytetów dla każdej chwili z okresu modelowania. Wyniki mogą być przedstawione w postaci wykresu priorytetów jako funkcji czasu (przykład podany jest na rys. 2), przy założeniu wystąpienia w przeszłości określonych zdarzeń.

Główne etapy procedury wspomagania decyzji zwracającej wyniki zarówno ilościowe (oczekiwane przyszłe wartości wskaźników w obrębie każdego scenariusza), jak też i jakościowe (ranking priorytetów), są przedstawione niżej.

1. Nadrzędne cele polityczne, wskaźniki i dane makroekonomiczne są określone podczas fazy gromadzenia wiedzy.

2. Początkowe rankingi są konstruowane za pomocą metody analizy wielokryterialnej wybranej przez ekspertów wspomagających proces decyzyjny i przedyskutowane z osobami podejmującymi decyzje. W szczególności, do tworzenia rankingów rekomendowana jest metoda wielu punktów odniesienia, MREF, oraz metoda zbiorów odniesienia – REFSET 0, chociaż stosowane mogą być także inne metody rankingowe, w tym oparte o wyznaczenie współczynników liniowej agregacji kryteriów (tzw. scoring) [3; 9].

3. Po zdefiniowaniu obszarów polityki technologicznej $A_j, j=1, \dots, K$, do każdego z nich przyporządkowany może być początkowy Wskaźnik Relatywnej Ważności $\omega_j(t_0) \in (0, 1]$, na podstawie wytycznych zatwierdzonych przez władze. Wskaźnik ten umożliwi wstępne uporządkowanie obszarów interwencji opierając się na preferencjach politycznych (wyniki głosowań organów wybieralnych, badania opinii społecznej, preferencje władz nadrzędnych itp.).

4. Do opisu dynamiki rankingów i wyznaczenia rankingu docelowego konieczne jest uwzględnienie ewolucji wskaźników [12] i innych charakterystyk ilościowych rozważanych w badaniach foresightowych oraz analizy możliwości i tempa osiągnięcia celów strategicznych.

5. Ilościowe prognozy rozwoju zasobów ludzkich, wzrostu ekonomicznego, preferencji społecznych i przyszły budżet mogą być opracowywane przy zastosowaniu adaptacyjnej analizy trendu, na podstawie dostępnych danych statystycznych.

6. Należy scharakteryzować zbiór zdarzeń zewnętrznych, mogących wpłynąć na implementację projektów i ich dynamikę.

7. Należy scharakteryzować przyszłe scenariusze oraz ich związki ze wskaźnikami ilościowymi zdarzeń (zbiór $X(Q)$).

Konstrukcja rankingu, który jest częścią powyższej procedury może być zatem przedstawiona ogólnie jako:

ALGORYTM 1

Krok 1. Zdefiniuj obiekty, które mają być uporządkowane (ten krok może być częścią poprzednich etapów analizy i prognozowania).

Krok 2. Przypisz obiektom kryteria i określ ich wartości. Uwzględnij wstępne Wskaźniki Relatywnej Ważności obiektów, $\omega_j(t_0)$, jako jedno z kryteriów ilościowych.

Krok 3n. Zbierz i zaprezentuj wiedzę o przyszłości (trendy, scenariusze szacunki ekspertów, prognozy i ich wzajemne zależności) oraz jej wpływ na wartość kryteriów i innych elementów struktury preferencji decydentów.

Krok 4n. Zbuduj ranking w chwili t_0 do zastosowania na przedziale $[t_0, T)$ używając wybranej metody rankingowej.

Krok 5n. Przełóż rezultaty rankingów na rekomendacje ekspertów, jakie zostaną przedstawione osobom podejmującym decyzje.

Krok 6. Powtórz kroki 3n-5n po każdej zmianie decydentów, prognoz, parametrów lub okoliczności zewnętrznych.

3. Zastosowania metody DPR

Stosując przedstawioną wyżej procedurę i metody tworzenia rankingów opartej o zbiory odniesienia (REFSET [13]), możemy utworzyć dynamiczny ranking ważności priorytetów jako funkcji czasu.

Ogólna procedura opisana w algorytmie 1 może zostać uszczegółowiona poprzez dokładniejszy opis elementów dynamicznych naszkicowanych w poprzedniej sekcji. W rezultacie otrzymamy:

ALGORYTM 2 (DYNAMICZNE RANKINGI PRIORYTETÓW, DPR)

Krok 1. Zdefiniuj obiekty, które powinny być uszeregowane oraz opisz dynamikę ich ewolucji w okresie prognozowania rang.

Krok 2. Przypisz obiektom kryteria i określ ich wartości jako funkcje czasu. Dla początkowej chwili $n := t_0$ uwzględnij wstępne Wskaźniki Relatywnej Ważności obiektów, ω_j , $j = 1, \dots, K$, jako jedno z kryteriów ilościowych (jeśli nie są określone, wówczas można przyjąć $\omega_j = 1$ dla wszystkich j).

Krok 3. Zbierz i zaprezentuj wiedzę o przyszłości (trendy, zdarzenia, scenariusze, szacunki ekspertów, prognozy oraz ich wzajemne relacje oraz wpływ komponentów tej wiedzy na wartości kryteriów rankingowych, osiąganie celów strategicznych i innych elementów struktury preferencji decydentów (np. tzw. progi weta w metodzie ELECTRE Iv [1; 19])).

Krok 4n. Dla $n = t_0, \dots, N$ opisz ilościowo zależność rankingów priorytetów w chwili $(n+1)$ od rankingów w chwili n , uwzględniając zmiany wartości kryteriów, zmiany struktury preferencji będące rezultatem Kroku 3 oraz – dodatkowo – inercję rankingów, opisaną jako dodatkowe kryterium kosztowego, proporcjonalnego od odległości H rankingów w chwilach n i $(n+1)$ zdefiniowanej wzorem

$$H(r(n), r(n+1)) := \sum_{1 \leq k \leq K} s_k |r(n, k) - r(n+1, k)| / P(K) \quad (6)$$

gdzie $r(n, k)$ oznacza rangę k -tego obiektu w rankingach $r(n)$ w chwili n , a $P(K) = K(K-1)/2$ jest maksymalną odległością dwóch rankingów K obiektów. Współczynniki proporcjonalności $s_k > 0$ zależą od rzeczywistych kosztów zmiany rankingów poszczególnych obiektów (np. koszty publikacji ogłoszeń itp.). Mogą też zależeć od wartości $r(n, k) - r(n+1, k)$, różniąc się np. dla dodatnich i ujemnych wartości tej różnicy.

Krok 5n. Zbuduj ranking $r(n)$ dla chwili n za pomocą wybranej wielokryterialnej metody rankingowej (rekomendowana metodą jest metoda zbiorów odniesienia REFSET). Następnie opierając się na $r(n)$ i rezultatach Kroku 4n dla $n+1$ utwórz ranking $r(n+1)$. Kontynuuj aż osiągnięty zostanie horyzont planowania N .

Krok 6. Utwórz ranking dynamiczny $r(t_0, \dots, N)$. Wizualizuj zależność rang w $r(t_0, \dots, N)$ od czasu dla wybranych obiektów.

Ranking – pomimo znaczenia poznawczego – nie jest zazwyczaj ostatecznym celem analizy. Dlatego też rezultaty rankingów $r(t_0, \dots, N)$ powinny zostać przełożone na rekomendacje ekspertów, jakie zostaną przedstawione osobom podejmującym decyzje o przydziale środków finansowych na przedsięwzięcia powiązane z szeregowanymi technologiami lub projektami, biorąc pod uwagę także rezultaty innych metod analitycznych stosowanych w planowaniu oraz cele polityki osiągnięte wcześniej. Rekomendacje takie mogą mieć formę np. struktury preferencji określonej dla obiektów umiejscowionych w hierarchii polityki rozwojowej niżej od obszarów polityki lub nadrzędnych celów strategicznych (por. [13], np. dla regionalnych projektów infrastrukturalnych. Przykład takiej procedury, gdzie algorytm 2 zastosowany został do alokacji środków na projekty, podany zostanie w następnej sekcji.

Otrzymany ranking $r(t_0, \dots, N)$ powinien być aktualizowany zgodnie ze zdefiniowanymi wcześniej zasadami polityki regionalnej za każdym razem, gdy osiągnięty zostanie jeden z celów strategicznych lub w przypadku istotnej zmiany warunków zewnętrznych.

Przed implementacją części obliczeniowej algorytmu 2, w celu uzyskania adekwatnych procedur wspomaganie decyzji należy zbudować model struktury informacyjnej opisanej w Kroku 4 algorytmu 2. W szczególności, należy odpowiednio zinterpretować zależności ilościowe oraz uwzględnić wpływ zmian technologicznych i wyników badawczych na atrybuty charakteryzujące populację lub badany zbiór obiektów [12] w modelu optymalizacji wielokryterialnej.

Ważnym elementem procedury wspomaganie decyzji jest odpowiednia wizualizacja otrzymanych rezultatów w postaci wykresu rang priorytetyzowanych obiektów w funkcji czasu. Wykres taki może zostać rozszerzony o wskaźniki pokazujące, również jako funkcje czasu dla tego samego okresu, stopień społecznego i ekonomicznego wpływu na osiągnięcie szeregowanych celów polityki technologicznej.

Dla zilustrowania idei dynamicznych rankingów przedstawionych w niniejszym rozdziale mniej istotny jest wybór metody rankingowej stosowanej w każdym kroku algorytmu 2. W związku z tym, dla uproszczenia, w poniższym przykładzie założymy, że statyczne rankingi tworzone w każdym kroku procedury dynamicznej oparte są na najprostszej metodzie scoringowej (przegląd takich metod podany jest w [13], chociaż ogólne zasady postępowania podane w algorytmie 2 pozwalają stosować także metody niekompensacyjne typu Electre czy Promethee [2]. Najprościej zastosować kryterium scoringowe o interpretacji „dobrobyt ogółu mieszkańców regionu” i założyć istnienie pewnych wag umożliwiających utworzenie sumy ważonej ze wskaźników charakterystycznych dla każdego z „obszarów” polityki. W przykładzie 1 zastosujemy ponadto dalsze uproszczenia:

- koszt „inercji” rankingu nie powinien być zbyt wysoki, z każdym priorytetyzowanym obszarem polityki regionalnej powiązany jest jeden cel reprezentowany przez jeden wskaźnik ilościowy,
- w każdej chwili dostępny jest tylko jeden scenariusz,
- wykorzystywane przy aktualizacji rankingów prognozy dotyczą jedynie czasów i stopnia osiągnięcia celów związanych z każdym z priorytetyzowanych obszarów polityki regionalnej.

Przykład 1

Metody obliczeniowe i wizualizacja rezultatów priorytetyzacji pro-
rozkrojowych polityk technologicznej w jednym z regionów.

A. Priorytetyzowane obszary polityki, cele i wskaźniki

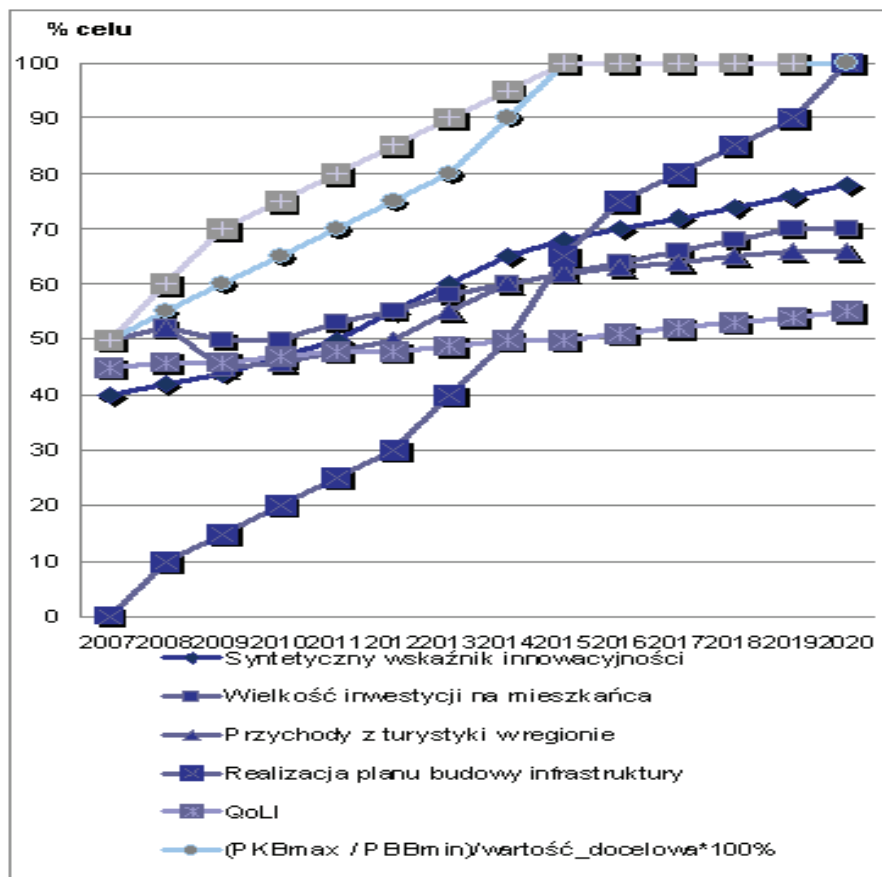
Tabela 1

Przykład celów politycznych mających wpływ na ocenę technologii

Lp.	Obszar polityki regionalnej	Cel polityki/rodzaj celu	Syntetyczny wskaźnik ilościowy
1	Warunki dla rozwoju społeczeństwa opartego na wiedzy	Osiągnięcie wskaźników charakteryzujących najbardziej rozwinięte regiony w UE (wielowskaźnikowy)	Suma ważona ilości patentów, sprzedaży produktów zaawansowanych technologii, ilości doktoratów itp.
2	Gospodarka regionalnej szansy	Trajektoria wartości inwestycji, w tym w sektorze high-tech	Skumulowana wartość inwestycji na mieszkańca pomniejszona o ich amortyzację
3	Turystyka i kultura	Trwały wzrost wpływów z turystyki, osiągnięcie określonego opisowo poziomu usług	Skumulowana suma wpływów z turystyki w regionie w okresie planowania
4	Infrastruktura dla rozwoju gospodarczego	Realizacja szczegółowego planu budowy infrastruktury komunikacyjnej i telekomunikacyjnej	Procentowy (rzeczowy) stopień realizacji planu budowy infrastruktury (tele)komunikacyjnej
5	Rozwój Obszaru Metropolitalnego	Zwiększenie atrakcyjności centrum metropolitalnego	Wskaźnik jakości życia (QoLI według the Economist)
6	Spójność wewnątrzregionalna	Zmniejszenie różnicy poziomu życia i PNB na mieszkańca pomiędzy gminami regionu do co najwyżej 50%	Stosunek PNB na mieszkańca w wieku produkcyjnym pomiędzy gminami regionu
7	Infrastruktura ochrony środowiska	Osiągnięcie docelowych wartości wskaźników charakteryzujących czystość wód, powietrza, udział recyklingu i odpadów sortowanych itp.	Regionalny indeks oddziaływania na środowisko (suma ważona indeksów cząstkowych dla rodzajów oddziaływań i jednostek administracyjnych)

B. Założenia

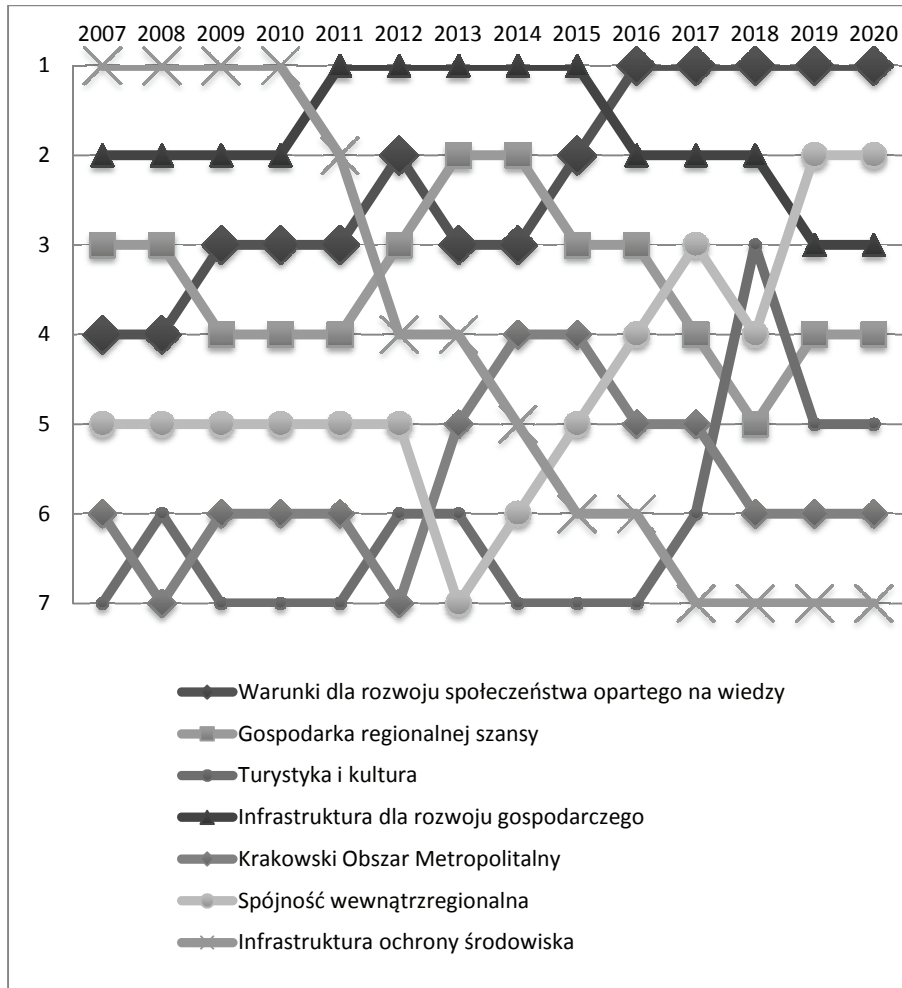
1. Dostępne prognozy: dla każdego celu związanego z obszarem polityki zakładamy znajomość trajektorii jego osiągnięcia, tj. wartości powiązanego syntetycznego wskaźnika jako funkcji czasu (rys. 1).



Rys. 1. Założone wartości wskaźników osiągnięcia celów regionalnych zastosowane w metodzie DPR dla analizy priorytetów Małopolski w okresie 2007-2020 (w % wyznaczonego celu)

2. Chwilowe wartości współczynników „ważności obszaru polityki” $\omega_j(t)$, $0 < \omega_j(t) \leq 1$, $j = 1, \dots, 7$, $2007 \leq t \leq 2020$, zależą liniowo od procentowego stopnia zostało osiągnięcia odpowiedniego wskaźnika w danej chwili (im więcej, tym są mniejsze) oraz od wartości początkowych dla $t = 2007$.

3. Wartości wszystkich wskaźników ilościowych są znormalizowane i należą do przedziału $[0; 1]$.



Rys. 2. Przykład zastosowania metody DPR dla analizy priorytetów w okresie 2007-2020

4. Funkcja scoringowa, służąca do porządkowania obszarów polityki regionalnej dla każdego t , ma postać sumy poszczególnych wskaźników ilościowych ważonej przez współczynniki $\omega_j(t)$,

5. Inercja rankingów obliczana jest według wzoru (6), przy czym wszystkie wartości $s_k(t)$ są równe 0,01.

Wykres dynamicznych rang priorytetów obszarów polityki regionalnej, będących wynikiem zastosowania algorytmu 2 do powyższej struktury danych przedstawiono na rys. 2.

4. Zastosowanie rezultatów priorytetyzacji technologii do alokacji środków

Wyniki algorytmu 2 oraz opisane wyżej podejście dynamicznego rankingu mogą być zastosowane w następującej procedurze alokacji zasobów na projekty technologiczne, która wykorzystuje systemy zdarzeń dyskretnych do modelowania niezależnych od decydenta zjawisk i procesów wpływających na alokację:

ALGORYTM 3

Struktura danych

1. Charakterystyka stanu obecnego regionu, gdzie wdrażana jest strategia – w postaci wektora $X(Q)$, którego współrzędne są wartościami odpowiednich wskaźników.

2. Ograniczenia na wysokość alokacji środków, łącznie, w odniesieniu do branż i podregionów oraz w każdym okresie planowania.

3. Zbiór $S(0)$ scenariuszy początkowych przyszłych stanów systemu rozpoczynających się w ustalonym podzbiornie Q_0 stanów początkowych systemu Q w chwili t_0 , będącej zakładanym początkiem wdrażania strategii (gdy chwila t_0 jest bliska chwili tworzenia strategii, wówczas najczęściej $Q_0 := \{q\}$). Scenariusze i prognozy są rezultatem przeprowadzonych wcześniej badań foresightowych [15; 18].

4. Algorytm η tworzenia rankingu projektów r w zależności od rankingu priorytetowych celów strategicznych $R := (C_1, \dots, C_l)$. Zakładamy przy tym, że realizacja każdego projektu p jest działaniem zmieniającym stan systemu Q w ten sposób, że możliwe jest ilościowe określenie $\varphi_i := \varphi(C_i)$ (np. jako wskaźnik procentowy) stopnia osiągnięcia każdego z celów priorytetowych C_i po zakończeniu projektu. Zakładamy ponadto, że dla każdego celu strategicznego C_i z rankingu R określona jest funkcja $\alpha_i(t)$ interpretowana jako (dodatni) współczynnik istotności celu C_i i spełniająca warunek

$$C_i \triangleleft_t C_j \Rightarrow \alpha_i(t) < \alpha_j(t)$$

gdzie „ \triangleleft_t ” jest porządkiem w rankingu celów strategicznych zależnym od czasu. Reguła decyzyjna algorytmu η może być wówczas zdefiniowana przez warunek

$$p_k \leq_t p_l \Leftrightarrow \sum_{1 < i < l} \alpha_i(t) [\varphi_i(p_k) - \varphi_i(p_l)] < 0$$

z wynikowym porządkiem „ \leq_t ” stosowanym w rankingu projektów r .

5. Reguła alokacji funduszy na projekty γ w zależności od rankingu projektów r . Obowiązuje ogólna zasada, że środki otrzymują projekty najwyżej ocenione, jednak γ musi uwzględniać zarówno ograniczenia budżetowe w każdym z okresów, jak i ograniczenie na łączną wysokość alokowanych środków. Ponadto zakładamy, że rezygnacja z projektu, będąca wynikiem zmiany rankingu, związana jest z pewną stratą zależną od stanu realizacji projektu (brak opcji rezygnacji) oraz że strata ta może być agregowana z jednym z kryteriów oceny projektów.

6. Kryterium ewaluacyjne G , określające jakość alokacji środków w całym okresie planowania.

Krok 1. Za pomocą wybranej metody analizy wielokryterialnej znajdź rankingi (w funkcji scenariusza)

$$r(t_0; S(0)) := \{(p_{1,s(0)}, \dots, p_{k(0),s(0)}) : s(0) \in S(0)\}$$

dla projektów, które mają być sfinansowane w chwili $t = t_0$.

Krok 2. Zastosuj regułę alokacji funduszy $\gamma := \gamma(p, s)$ dla projektów $(p_{1,s(t)}, \dots, p_{k(0),s(t)})$ i scenariusza s , gdzie $\gamma(p, s)$ jest macierzą o wymiarze $k(0) \times T$.

Krok 3n. Wyznacz wartość kryterium jakości alokacji środków $G(0) := G(0, \gamma)$. Zastosuj regułę sterowania δ do zdarzeń tworzących scenariusze ze zbioru $S(n)$ i do ewentualnych zdarzeń zewnętrznych.

Krok 4n. Aktualizuj rankingi (w funkcji scenariusza) $r(t_0, S(0)) = (p_{1,s(t)}, \dots, p_{k(0),s(t)})$ projektów, które mają być sfinansowane dla $t = t_0$ określone w Kroku 1. Znajdź wartość kryterium jakości alokacji środków $G(n)$. Jeśli $G(n) \leq G(n-1)$, zbadaj zależność między wartością $G(n) - c(n, S(n)) + g(n, S(n))$ a $G(n-1)$, wyznacz wartość optymalną. Zastosuj sekwencję operacji $(v(1,1), \dots, v(1,k))$, $v(i,j) \in V$ zgodnie z (5), odpowiadającą wybranemu scenariuszowi aktualizacji, wyznacz nową wartość $G'(n)$.

Krok 5n. Zastosuj regułę alokacji środków γ do $(p_{1,n(t)}, \dots, p_{k(n),n(t)})(s)$ dla scenariusza aktualizacji s .

Krok 6n. Powtórz kroki 3n-5n dla n zmieniającego się w okresie alokacji środków.

Krok 7. Wyznacz wartości końcowe kryteriów alokacji zasobów.

Scenariusze zastosowane w powyższym schemacie przydziału środków mogą być generowane w sposób typowy dla klasycznych metod foresightu [15; 18]. Mogą też być rezultatem zastosowania metod generowania najpierw scenariuszy elementarnych w systemach zdarzeń dyskretnych i następnie ich klasteryzacji. Niezależnie od metody, wymagane jest by opis scenariusza był spójny z opisem systemu (5), $X(Q)$ oraz z parametrami celów strategicznych C_i . Możliwe jest wówczas zastosowanie metod prognozowania wskaźników systemu „wewnątrz” każdego scenariusza, tj. tworzenie prognoz warunkowych,

przy założeniu zajścia zdarzeń charakteryzujących dany scenariusz. Ze względu na zazwyczaj stosunkowo niewielką liczbę danych w powstałych w ten sposób szeregach czasowych, celowe jest ich wstępne wygładzenie (czyli ograniczenie wariancji) poprzez transformacje uśredniające lub agregację obwiedni ekstremalnych.

Podsumowanie

Opisany sposób postępowania powinien zapewnić lepsze dopasowanie procedur rozdziału funduszy przeznaczonych na inwestycje do zmieniających się potrzeb i okoliczności zewnętrznych. Konkretna implementacja algorytmów, w szczególności wybór metody rankingowej stosowanej w celu konstrukcji indywidualnych rankingów w każdej chwili okresu prognozowania, musi być dostosowany do potrzeb decydentów i specyfiki interesariuszy rankingów. Warto zauważyć, że pomimo istnienia ogólnych zasad tworzenia wieloletnich strategii inwestycyjnych, w konkretnych zastosowaniach indywidualnemu doborowi podlegają metody tworzenia i charakterystyki scenariuszy, metody rankingowe, reguły uzależniające rankingi projektów technologicznych od uszeregowania priorytetów wynikających z polityki (regionalnej, krajowej lub unijnej), a także operacyjne reguły alokacji środków na projekty. W związku z tym, w celu efektywnego zastosowania przedstawionych tu podstaw dynamicznej adaptacji strategii inwestycyjnych i opartych na nich procedur do zmiennych warunków otoczenia wskazane jest, by przed rozpoczęciem opracowywania dokumentów strategicznych decydenci nawiązali współpracę z instytucjami naukowymi zajmującymi się metodami analizy wielokryterialnej.

Oprócz problemów związanych z rozdziałem środków publicznych, przedstawiona tu metodyka może być stosowana do wyboru inwestycji finansowych [14], w szczególności do uszeregowania akcji spółek wybieranych do portfela biorąc pod uwagę scenariusze rozwoju sytuacji na rynku kapitałowym [17]. Podobne metody stosowane są także do oceny innowacji technologicznych zgłaszanych na konkursy organizowane przez Centra Transferu Technologii [16]. Należy przy tym mieć na uwadze, że dla każdej klasy zastosowań powinna być zaprojektowana indywidualnie dostosowana architektura systemu wspomagania decyzji wielokryterialnych z odpowiednio zintegrowaną bazą wiedzy. Taki system wspomagania decyzji może być zastosowany również do analizy rezultatów foresightu branżowego czy regionalnego i – w razie potrzeby – do aktualizacji celów polityki sektorowej czy regionalnej, a także celów korporacyjnej strategii inwestycyjnej.

Literatura

1. Barrios S., Strobl E. (2009). The Dynamics of Regional Inequalities. *Regional Science and Urban Economics*, 39, s. 575-591.
2. Bouyssou D., Marchant T. (2007). An Axiomatic Approach to Noncompensatory Sorting Methods in MCDM. The Case of Two Categories. *European Journal of Operational Research*, 178, s. 217-245.
3. Chebotarev P.Yu., Shamis E. (1998). Characterizations of Scoring Methods for Preference Aggregation. *Ann. Oper. Res.*, 80, s. 299-332.
4. Henig M.I. (1985). The Shortest Path Problem with Two Objective Functions. *European Journal of Operational Research*, 25, s. 281-291.
5. Kaliszewski I. (2008). Wielokryterialne podejmowanie decyzji. Obliczenia miękkie dla złożonych problemów decyzyjnych. WNT, Warszawa, s. 154.
6. Martins E.Q.V. (1984). On a Multicriteria Shortest Path Problem. *European Journal of Operational Research*, 16, s. 236-245.
7. Medaglia A.L., Hueth D., Mendieta J.C., Sefair J.A. (2008). A Multiobjective Model for the Selection and Timing of Public Enterprise Projects. *Socio-economic Planning Sciences*, 42, s. 31-45.
8. Opananon S., Miller-Hooks E. (2006). Multicriteria Adaptive Paths in Stochastic, Time-varying Networks. *European Journal of Operational Research*, 173, s. 72-91.
9. Saaty T.L. (2006). Rank from Comparisons and from Ratings in the Analytic Hierarchy/Network Processes. *European Journal of Operational Research*, 168, s. 557-570.
10. Salo A., Mild P., Pentikäinen T. (2006). Exploring Causal Relationships in an Innovation Program with Robust Portfolio Modeling. *Technological Forecasting and Social Change*, 73, s. 1028-1044.
11. Skulimowski A.M.J. (1991). Optimal Control of a Class of Asynchronous Discrete-Event Systems. W: *Automatic Control in the Service of Mankind. Proceedings of the 11th IFAC World Congress, Tallinn (Estonia), Aug. 1990.* Pergamon Press, London, 3, s. 489-495.
12. Skulimowski A.M.J. (1994). Optimizing the Structure of a Partitioned Population. W: *System Modelling and Optimization; Lecture Notes in Control and Information Sciences.* Red. J. Henry i J.P. Yvon. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 197, s. 771-782.
13. Skulimowski A.M.J. (1997). Methods of Multicriteria Decision Support Based on Reference Sets. W: *Advances in Multiple Objective and Goal Programming, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems.* Red. R. Caballero, F. Ruiz, R.E. Steuer. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 455, s. 282-290.

14. Financial Modelling – Proceedings of the 23rd Meeting of the EURO WG on Financial Modelling. Red. A.M.J. Skulimowski. (1999). Cracow, October 8-10, 1998. Progress & Business Publishers, Kraków, s. 504.
15. Skulimowski A.M.J. (2006). Framing New Member States and Candidate Countries Information Society Insights. W: Prospects for a Knowledge-Based Society in the New Members States and Candidate Countries. Red. R. Compano, C. Pascu. Publishing House of the Romanian Academy, s. 9-51.
16. Transfer Technologii w Informatyce i Automatyce (Technology Transfer in Computer Science and Automation). (2006). Red. A.M.J. Skulimowski. Progress & Business Publishers, Kraków, 2006, s. 406.
17. Skulimowski A.M.J. (2008). Application of Dynamic Rankings to Portfolio Selection. W: New Developments in Financial Modelling. Red. J.O. Soares, J.P. Pina, M. Catalão-Lopes. Newcastle, CSP Cambridge Scholars Publishing, 2008. Proceedings of the 41st Meeting of the Euro Working Group on Financial Modelling. Lisbon, Portugal, November 8-9, 2007, s. 196-212.
18. Priorytetyzacja celów polityki regionalnej w kontekście efektywnego wykorzystania Funduszy Strukturalnych. Raport Końcowy projektu nr POPT.03.01.00-00-002/07zrealizowanego w roku 2008 w ramach I edycji Konkursu Dotacji Fundusze Europejskie na poziomie NSS. (2009). Red. A.M.J. Skulimowski. Kraków.
19. Trzaskalik T. (2011). Metody rankingowe w wielokryterialnym podejmowaniu decyzji. W: Metody wielokryterialnego wyboru i konstrukcji rankingów projektów finansowanych ze środków publicznych. Red. A.M.J. Skulimowski. Wydawnictwo Progress and Business, Kraków, s. 31-55.
20. Yen-Liang Chen, Li-Chen Cheng (2010). An Approach to Group Ranking Decisions in a Dynamic Environment. Decision Support Systems, 48, s. 622-634.

METHODS OF FORECASTING DYNAMIC RANKINGS OF TECHNOLOGICAL PRIORITIES

Summary

This paper is devoted to the elaboration of methodological foundations of forecasting models that may be applied to establish anticipated future rankings of key technologies or strategic goals. We will also present the resulting practical approaches for rankings arising in some relevant classes of multicriteria decision problems. Usually, such rankings are built in within strategic planning activities and rely on results of prior as well as simultaneous foresight exercises. The rankings of technological priorities can then be applied to allocate the organization's budget to different investment areas covered by the competences of the authorities concerned. Another common approach to apply the rankings is to define the temporal relevance of priorities, i.e. those ranked higher are considered first. We will show how the dynamic rankings can be constructed from forecasts or foresight results concerning the external circumstances, economical,

social, and technological, using a dynamic programming model. The forecasting model presented in Secs. 3-5 contains the rules which govern the actions of the decision makers when a technological priority changes in a response to an external event or as a result of achieving certain goals. The novelty of the *dynamic priority ranking approach* (DPR) here presented consists a.o. in the fact that the mutual impacts of events forming and influencing future scenarios are taken into account in one model jointly. The forecasting results are visualised as a time-dependent relative priority importance chart showing the priorities on an ordinal scale. In Sec.5 we will provide an illustrative example of the real-life applications of the adaptive ranking methodology to rank key intervention areas in a foresight exercises, where the ranking forecasts have been derived using the reference-set-based outranking method. Using an assignment algorithm provided in Sec. 5, the results can be applied to assign funding to innovative technological projects.