

Miejsce metody DEMATEL w rozwiązywaniu złożonych zadań decyzyjnych

Autor: Mirosław Dytczak, Grzegorz Ginda

Abstrakt

Metoda DEMATEL została opracowana w latach 70. XX w. jako narzędzie umożliwiające identyfikację roli elementów łańcucha przyczynowo-skutkowego. Utworzono ją z myślą o rozwiązywaniu problemów gospodarczych, społecznych i ekonomicznych współczesnego świata. W ostatnich kilkunastu latach zainteresowano się nią ponownie. Dzięki prostocie zasad przetwarzania informacji na temat bezpośrednich powiązań elementów oraz elastyczności znalazła liczne zastosowania w rozwiązywaniu złożonych zagadnień decyzyjnych znacznie odbiegających od jej pierwotnego przeznaczenia. Obecnie jest wykorzystywana także w połączeniu z innymi narzędziami przetwarzania informacji i wspomagania decyzji. Zasila je w niezbędne dane lub korzysta z nich do pozyskania danych wejściowych. Używa się jej również do poszerzenia funkcjonalności narzędzi stosowanych we wspomaganiu decyzji. Szczegóły na ten temat przedstawiono w artykule.

Słowa kluczowe: DEMATEL, rozwój, zastosowanie, wspomaganie złożonych decyzji, zarządzanie

JEL: C650, C630.

Wprowadzenie

DEMATEL stanowi metodę wspomagania decyzji opracowaną pierwotnie na potrzeby realizacji przedsięwzięcia badawczego *DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory of the Science and Human Affairs Program*, realizowanego w latach 1971–1976 w *Batelle Research Center (Batelle Memorial Institute)* w Genewie (Fontela i Gabus 1976a). Metodę opracowali: Emilio Fontela i André Gabus (*zob. fot. 1*).

Zasadniczym celem przedsięwzięcia było określenie zależności przyczynowo-skutkowych między globalnymi i regionalnymi problemami ekonomicznymi, społecznymi i gospodarczymi. Liczono przy tym na ułatwienie rozwiązania problemów dzięki identyfikacji spośród nich tych, które bezpośrednio lub pośrednio powodują występowanie innych problemów. Istotnym celem przedsięwzięcia było również rozpoznanie

percepcji problemów współczesnego świata (Fontela i Gabus 1976). Temu celowi służył proces przetwarzania informacji o powiązaniach 48 problemów, uzyskanej na podstawie opinii 48 ekspertów. Strukturę powiązań przyczynowo-skutkowych uzyskaną na podstawie zebranej informacji przedstawia rys. 1. W wyniku analizy informacji określono także prawidłowości związane z percepcją problemów, m.in. wyróżniając grupy ekspertów podobnie odbierających problemy świata.

Po opracowaniu metody była ona sporadycznie wykorzystywana w celu rozwiązywania zagadnień o podobnym charakterze. Na początku lat 90. poprzedniego stulecia uznano ją za jedno z najbardziej obiecujących narzędzi eksperckich wieloatrybutowej analizy decyzji, służących do strukturyzacji złożonych zagadnień decyzyjnych i ułatwiających ich rozwiązywanie (Chen i Hwang 1992). Przełom w rozwoju metody przyniosły



E. Fontela (1938–2007)

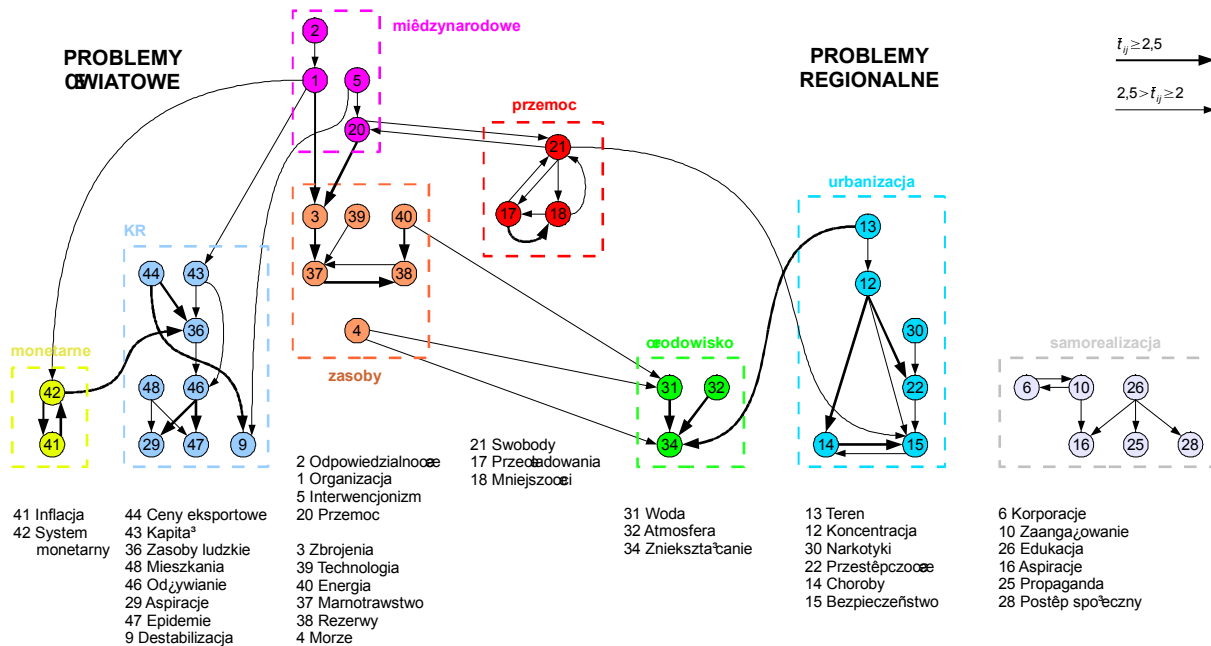


A. Gabus (ur. 1931)

Fot. 1. Twórcy metody DEMATEL

[Źródło: sieć Internet]

Rys. 1. Struktura powiązań między problemami współczesnego świata



Źródło: opracowanie własne na podstawie: (E. Fontela, A. Gabus 1976a)

dopiero ostatnie lata starego i pierwsze nowego stulecia. Pojawiły się wtedy jej zastosowania znacznie odbiegające od dotychczasowych. Metoda okazała się bowiem użyteczna przy rozwiązywaniu zagadnień praktycznych związanych ze zróżnicowanymi dziedzinami, wśród których wyróżnić można:

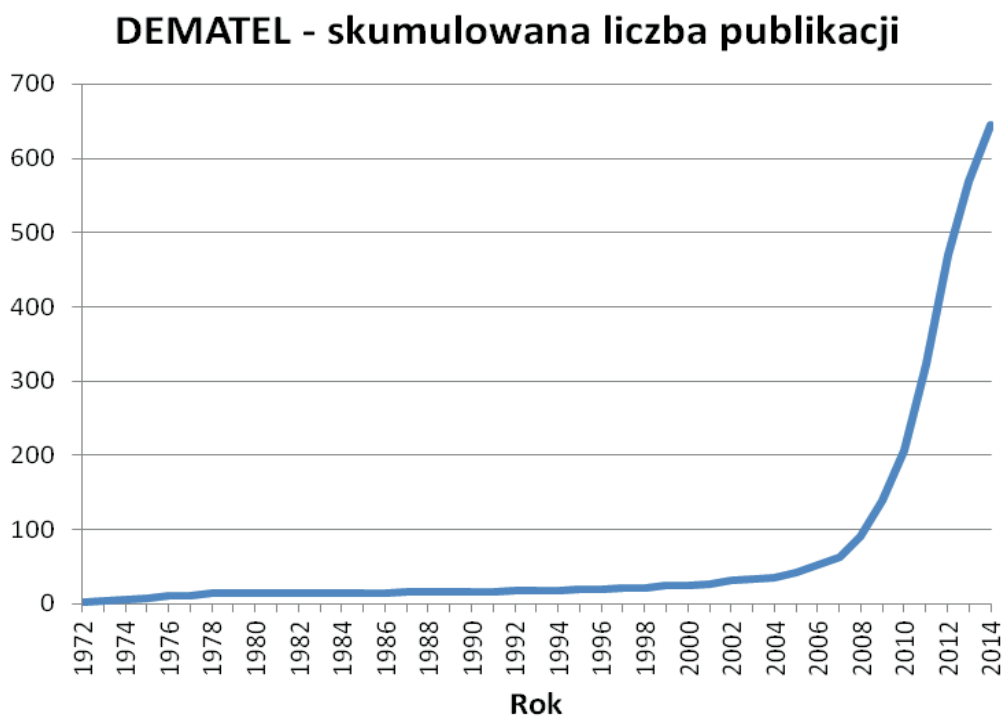
1. Kształtowanie produktów i usług, zarządzanie przedsiębiorstwem, informacją i wiedzą, przedsięwzięciami, zasobami ludzkimi oraz technologią, marketing.
2. Budownictwo i inżynieria środowiska, gospodarka remontowa i komunalna oraz

gospodarka nieruchomościami, transport i logistyka, energetyka i bezpieczeństwo publiczne.

3. Edukacja, systemy informacyjne, medycyna, wspomaganie innowacyjności, finanse, bankowość i ubezpieczenia.

Nowe zastosowania przyczyniły się do licznych udoskonaleń metody. Wiążą się one zarówno z rozbudową i modyfikacjami tradycyjnych części procedury obliczeniowej, jak i reprezentacją informacji na temat powiązań między elementami rozważanych systemów oraz otrzymywanych rezultatów. Zalety metody, w tym zwłaszcza

Rys. 2. Ilustracja rozwoju popularności metody DEMATEL



Źródło: opracowanie własne

możliwość uwzględniania wpływu trudnierzalności i sprzężeń w oddziaływaniach między elementami oraz elastyczność, sprawiają, że jest ona również wykorzystywana do udoskonalania powszechnie znanych narzędzi wykorzystywanych w różnych dziedzinach. Udoskonalanie to odbywa się w formie integracji mechanizmów obliczeniowych metody DEMATEL z procedurami stosowanymi w takich narzędziach lub wspólnego wykorzystywania metody z takimi narzędziami. W ten sposób można skutecznie eliminować niedostatki – zarówno metody DEMATEL, jak i jednocześnie wykorzystywanych z nią narzędzi – oraz skutecznie dopasowywać te narzędzia do potrzeb związanych z rozwiązywanymi zagadnieniami. O atrakcyjności metody w tym kontekście świadczy fakt, że liczba przypadków eliminacji niedostatków innych narzędzi za pomocą metody osiągnęła w ciągu kilku ostatnich lat poziom zbliżony do liczby przypadków jej samodzielnych zastosowań.

Wzrastającą popularność metody dobrze ilustruje wzrost liczby publikacji na jej temat (zob. rys. 2). Obejmują one artykuły w recenzowanych czasopiśmie, rozdziały w książkach oraz referaty publikowane w materiałach z konferencji, sympozjów i seminariów, a także prace dyplomowe i rozprawy doktorskie. Z uwagi na naturę metody mają one przeważnie aplikacyjny charakter. Sporadycznie zdarzają się również

prace poświęcone jedynie rozwojowi metody. Przeważnie jednak rozwój ten jest dokumentowany w pracach poświęconych zastosowaniom metody.

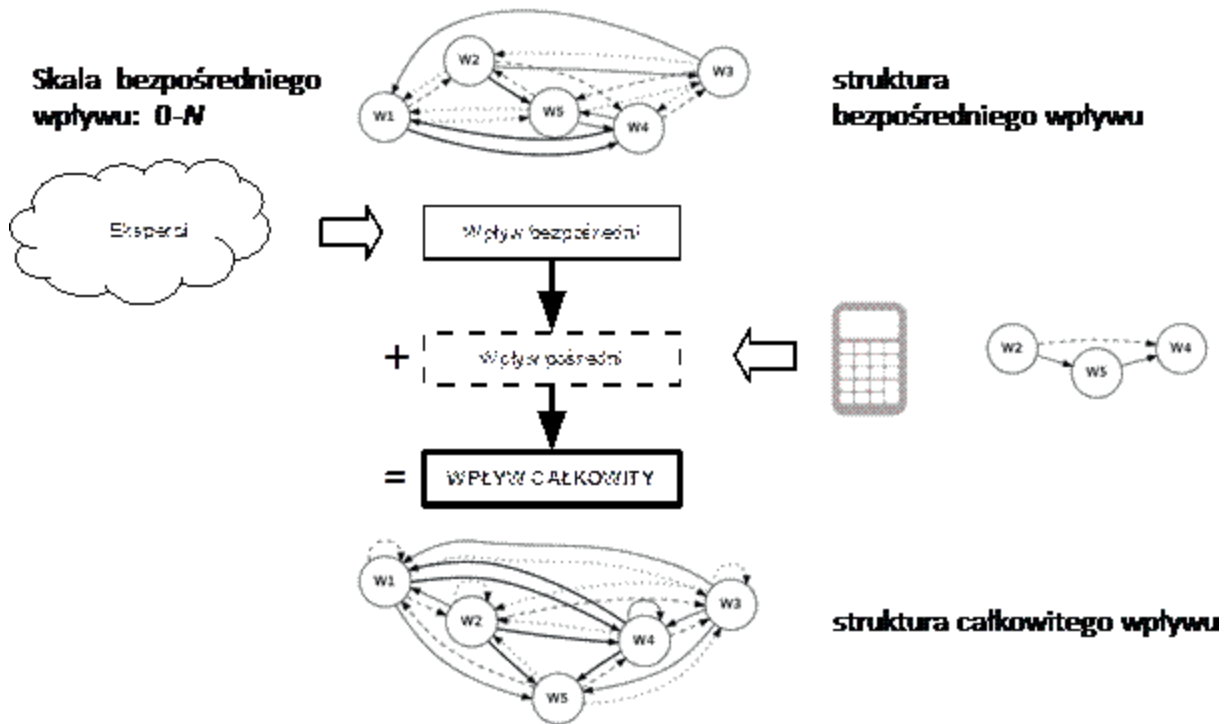
W dalszej części pracy scharakteryzowano zróżnicowane możliwości jej stosowania. Szczególną uwagę poświęcono przy tym miejscu zajmowanemu przez nią w trakcie analizy złożonych zagadnień decyzyjnych i wynikającym stąd korzyściom. Wcześniej jednak przedstawiono podstawy metody i wprowadzone do niej udoskonalenia.

DEMATEL

Oryginalny kształt metody

Podstawowym celem metody jest wyznaczenie zależności przyczynowo-skutkowych między składnikami rozważanego systemu oraz wynikającej stąd roli tych składników. W tym celu konieczne jest określenie bezpośredniego wpływu poszczególnych elementów na inne elementy. Sieć wszystkich powiązań-oddziaływań między elementami określamy mianem *struktury bezpośredniego wpływu*. Na jej podstawie jest wyznaczana *struktura pośredniego wpływu* (wywieranego za pośrednictwem innych elementów systemu), a następnie *struktura całkowitego wpływu*, obejmującego zarówno wpływ

Rys. 3. Schemat procedury metody DEMATEL



bezpośredni, jak i wpływ pośredni elementów. Na rys. 3 przedstawiono schemat postępowania prowadzącego do wyznaczenia struktury całkowitego wpływu na przykładzie struktury złożonej z 5 elementów (W1, W2, W3, W4 i W5). Na podstawie struktury całkowitego wpływu można także określić rolę – przyczynową lub skutkową – poszczególnych elementów systemu.

Do wyrażenia bezpośredniego wpływu w odniesieniu do pary elementów jest zwykle wykorzystywana wielopoziomowa, porządkowa skala bezpośredniego wpływu. Składa się na nią zawsze poziom zerowy (odpowiadający brakowi bezpośredniego wpływu pierwszego z porównywanych elementów na drugi) oraz pewna liczba poziomów wyrażających stopniowy wzrost intensywności bezpośredniego wpływu aż do wpływu ekstremalnego, wyrażanego przez najwyższy poziom skali N . Z poszczególnymi stopniami skali są powiązane kolejne liczby naturalne. Na przykład twórcy metody użyli skali od 0 do 4. Jej kolejne stopnie wyrażają bezpośredni wpływ pierwszego porównywanego elementu na drugi jako: 1 – niewielki, 2 – wyraźny, 3 – duży i 4 – ekstremalny.

Na podstawie przyjętej postaci skali określamy intensywność bezpośredniego wpływu i -tego elementu na element j -ty, oznaczając ją symbolem x_{ij}^* , przy czym: $i, j = 1, 2, \dots, n$, gdzie n jest liczbą

elementów systemu. Zgodnie z założeniem przyjętym przy tworzeniu metody DEMATEL każdy z elementów systemu może bezpośrednio wpływać na inne elementy, ale nie może wpływać na siebie. W przypadku każdego z elementów mamy więc możliwość oddziaływania na każdy spośród $n-1$ pozostałych elementów systemu. Do określenia struktury bezpośredniego wpływu potrzebujemy więc ocenić $n(n-1)$ relacji między elementami tworzącymi uporządkowane pary. Do odwzorowania struktury bezpośredniego wpływu wykorzystujemy macierz bezpośredniego wpływu X^* :

$$X^* = \begin{bmatrix} 0 & x_{12}^* & x_{13}^* & \dots & x_{1n}^* \\ x_{21}^* & 0 & x_{23}^* & \dots & x_{2n}^* \\ x_{31}^* & x_{32}^* & 0 & \dots & x_{3n}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1}^* & x_{n2}^* & x_{n3}^* & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

której kolejne wiersze i kolumny są poświęcone kolejnym elementom systemu, a także reprezentację grafową – w postaci skierowanego grafu (struktury) całkowitego wpływu $G(W,U)$, którego wierzchołki W odwzorowują elementy systemu, a ważone łuki U – kierunki i intensywność relacji bezpośredniego wpływu między elementami.

W celu wyznaczenia struktury całkowitego wpływu wykorzystujemy odpowiednio przekształconą – znormalizowaną macierz bezpośredniego wpływu \mathbf{X} spełniającą warunek (Fontela i Gabus 1976a):

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{X}^k = \mathbf{0}, \quad (2)$$

gdzie k jest liczbą naturalną, zaś $\mathbf{0}$ jest kwadratową macierzą zerową, rozmiarowo zgodną z macierzą bezpośredniego wpływu.

Dla jej określenia pierwotnie wykorzystywano maksymalną sumę wierszową elementów macierzy:

$$\mathbf{X} = \frac{1}{\max_{i=1,2,\dots,n} \left\{ \sum_{j=1}^n x_{ij}^* \right\}} \cdot \mathbf{X}^* . \quad (3)$$

Strukturę całkowitego wpływu opisuje macierz całkowitego wpływu \mathbf{T} :

$$\mathbf{T} = \mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}, \quad (4)$$

przy czym: $\Delta\mathbf{X}$ jest macierzą pośredniego wpływu reprezentującą strukturę pośredniego wpływu. Macierz $\Delta\mathbf{X}$ wyznaczamy na podstawie sumy rezultatów podnoszenia \mathbf{X} do kolejnych naturalnych wykładników, począwszy od wartości $k = 2$:

$$\Delta\mathbf{X} = \sum_{k=2}^{\infty} \mathbf{X}^k . \quad (5)$$

Zauważmy, że dzięki własności (2) suma (5) osiąga ograniczoną wartość. W rezultacie wyznaczanie $\Delta\mathbf{X}$ ogranicza się więc do uwzględnienia ograniczonej liczby składników sumy (5). Liczba ta jest tym większa, im wyższy jest poziom wymaganej dokładności obliczeń. Kolejną konsekwencją własności (2) stanowi możliwość uproszczenia zarówno zależności (5), jak i zależności (4), dzięki temu, że:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \mathbf{X}^k = \mathbf{X}(\mathbf{I} - \mathbf{X})^{-1}, \quad (6)$$

gdzie \mathbf{I} oznacza macierz jednostkową rozmiarowo zgodną z macierzą \mathbf{X} .

Ostatecznie więc mamy:

$$\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X}^2(\mathbf{I} - \mathbf{X})^{-1}, \quad \mathbf{T} = \mathbf{X}(\mathbf{I} - \mathbf{X})^{-1}. \quad (7)$$

Warto zauważyć, że w odróżnieniu od formuł (5) i (4) powyższe zależności mają dokładny charakter.

Otrzymana struktura całkowitego wpływu ma często bardzo złożony charakter. Dla jej uproszczenia jest więc stosowana redukcja, polegająca na zachowaniu informacji o jedynie najsilniejszych powiązaniach między elementami systemu. Wykorzystywany jest w tym celu dodatni próg całkowitego wpływu θ , eliminujący ze struktury najsłabsze powiązania. Zredukowaną

strukturę całkowitego wpływu wyraża zredukowana postać macierzy całkowitego wpływu \mathbf{T} , o następująco wyznaczanych wartościach składowych:

$$\forall_{i=1,2,\dots,n} \quad \forall_{j=1,2,\dots,n} \quad \bar{t}_{ij} = \begin{cases} t_{ij} & \Leftrightarrow t_{ij} \geq \theta, \\ 0 & \Leftrightarrow t_{ij} < \theta, \end{cases} \quad (8)$$

oraz zredukowana postać grafu całkowitego wpływu, pozbawiona łuków symbolizujących najsłabsze całkowite powiązania między elementami.

O roli poszczególnych elementów systemu można wywnioskować na podstawie 2 wskaźników – $s+$ i $s-$ otrzymywanych na podstawie wierszowych i kolumnowych sum macierzy \mathbf{T} :

$$\forall_{i=1,2,\dots,n} \quad s_i^+ = \sum_{j=1}^n t_{ij} + \sum_{j=1}^n t_{ji} ,$$

$$\forall_{i=1,2,\dots,n} \quad s_i^- = \sum_{j=1}^n t_{ij} - \sum_{j=1}^n t_{ji} . \quad (9)$$

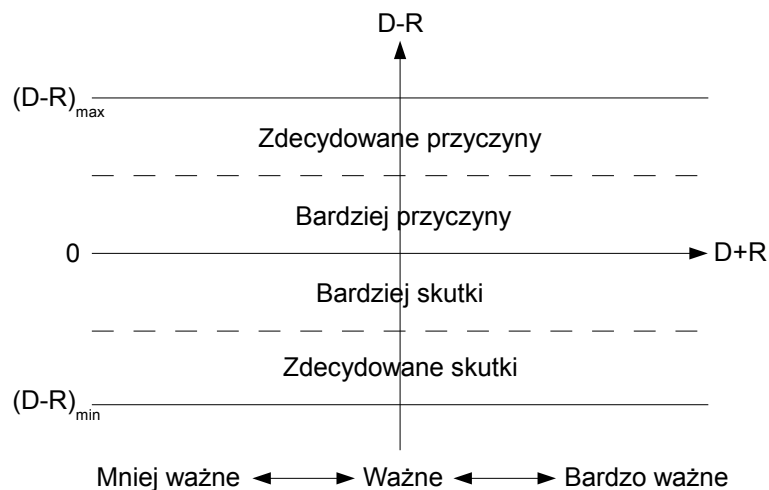
Wskaźnik $s+$ jest nazywany pozycją (ang. *position*), prominencją (ang. *prominence*) oraz wpływem brutto (ang. *overall influence*). Oznacza go również symbol D+R. Natomiast $s-$ określany jest jako relacja (ang. *relation*) lub wpływ netto (ang. *net influence*) i jest również oznaczany symbolem D-R. Oba wskaźniki stanowią stymulanty. Wartość pierwszego z nich wyraża relatywne znaczenie elementów, natomiast drugiego – charakter przyczynowy ($s \rightarrow 0$) lub skutkowy elementów ($s < 0$). Dzięki ich wykorzystaniu można dokonać dwuczynnikowej klasyfikacji elementów. Ilustruje ją wykres przyczynowy (ang. *causal diagram*) o schemacie przedstawionym na rys. 4.

Na zakończenie omawiania zasad metody w tradycyjnym ujęciu zwróćmy uwagę na 2 kwestie warte poruszenia. Po pierwsze metodę DEMATEL wyposażono w procedurę umożliwiającą uwzględnianie opinii grupy niezależnie pracujących ekspertów. Służy temu agregacja macierzy bezpośredniego wpływu $\mathbf{X}^{*(k)}$, zdefiniowanych przez poszczególnych K ekspertów. W tym celu jest zwykle wykorzystywana średnia arytmetyczna macierzy dostarczonych przez ekspertów ($k = 1, 2, \dots, K$):

$$\mathbf{X}^* = \frac{1}{K} \cdot \mathbf{X}^{*(k)} . \quad (10)$$

Po drugie w oryginalnej wersji metody (Fontela i Gabus 1976a) uwzględniono szereg narzędzi umożliwiających analizę podobieństwa i różnic między opiniami poszczególnych ekspertów, sposobu odbioru przez nich rozważanych problemów oraz charakteru współzależności problemów (sprzężeń i cykli). Obecnie możliwości

Rys. 4. Schemat wykresu przyczynowego



Źródło: opracowanie własne.

takiego wzbogacania analiz nie są jednak wykorzystywane.

Udoskonalenia metody

Opracowane udoskonalenia wynikają z potrzeb jej aplikacji w zróżnicowanych zastosowaniach. Dotyczą one m.in. zastosowania różnych skal pomiaru bezpośredniego wpływu, sposobu przetwarzania informacji o bezpośrednim wpływie i wyznaczania całkowitego wpływu, sposobów określania progowej wartości całkowitego wpływu, a także wprowadzenia możliwości wszechstronnej oceny i rangowania elementów systemu.

W praktyce dopuszcza się dowolną liczbę niezerowych stopni skali. Jest ona dobierana stosownie do potrzeb związanych z charakterem rozważanego zagadnienia. W praktyce są przyjmowane różne liczby niezerowych poziomów skali bezpośredniego wpływu – od $N = 1$ do $N = 100$. Najczęściej jednak wystarcza wybór skali o najwyższym stopniu $N = 3$ lub $N = 4$.

Umożliwiono również uwzględnienie niedoskonałości dostępnej informacji przy określaniu bezpośredniego wpływu elementów systemu. W ciągu kilku ostatnich lat zaproponowano wykorzystanie w tym celu zbiorów rozmytych różnych rodzajów, systemów „szarych” oraz komponentów teorii świadectwa Dempstera-Shafera. Zauważmy jednak, że już sama skala oceny intensywności bezpośredniego wpływu dostarcza możliwości modelowania niedoskonałego charakteru dostępnej informacji. Doświadczenia związane z innymi metodami wykorzystującymi podobne skale (Saaty i Tran 2007, Zhū 2014)

wydają się jednak sugerować zachowanie umiaru w stosowaniu niestandardowych reprezentacji bezpośredniego wpływu. Zauważmy także, że zastosowanie takiej reprezentacji zwykle powoduje konieczność dostosowania do niej mechanizmów obliczeniowych. Mogą one dodatkowo podwyższać złożoność analizy, nie przynosząc żadnych korzyści w kontekście uzyskiwanych rezultatów (Dytczak i Ginda 2013). Istnieje także problem wiarygodności takich mechanizmów, stanowiący rezultat arbitralnego ich wprowadzenia do obliczeniowej procedury metody. Wydaje się, że lepszym sposobem uwzględnienia niedoskonałości informacji jest zastosowanie danych stochastycznych oraz analizy wrażliwości. Natomiast w przypadku konieczności zastosowania niestandardowych reprezentacji bezpośredniego wpływu warto zadbać o odpowiednie jej przetworzenie do tradycyjnej postaci i wykorzystanie jej w obliczeniach. Na przykład w przypadku zastosowania liczb rozmytych można zastosować popularną procedurę ich wyostrzenia CFCS (ang. *Converting Fuzzy data into Crisp Scores*) Opricovica i Tzenga (2003).

W odniesieniu do procesu normowania macierzy bezpośredniego wpływu okazało się, że formuła (3) nie zawsze prowadzi do własności (2) macierzy X . W związku z tym zaproponowano szereg alternatywnych sposobów normalizacji tej macierzy. Wykorzystują one wyłącznie wartość maksymalnej sumy kolumnowej elementów macierzy lub zarówno wartość maksymalnej sumy wierszowej, jak i kolumnowej. W tym ostatnim przypadku interesujący sposób zaproponowali Lee i inni (2013). Z kolei sposób zaproponowany przez Mizuyamę i Ishidę (2007)

pozwała uniknąć normalizacji macierzy bezpośredniego wpływu. Polega on na dystrybucji bezpośredniego wpływu pomiędzy poszczególne elementy systemu.

Kolejne ulepszenia dotyczą sposobu ustalania progu całkowitego wpływu. Oprócz tradycyjnego, subiektywnego sposobu wyboru wartości progu ϑ istnieje także możliwość wykorzystania statystyk populacji ocen intensywności całkowitego wpływu zgromadzonych w macierzy \mathbf{T} . W tym celu są wykorzystywane: wartość przeciętna, kwartyle, wartość przeciętna zmodyfikowana za pomocą odchylenia standardowego, część maksymalnej intensywności całkowitego wpływu itp. Jest również dostępna metoda ustalania właściwej wartości ϑ – MMDE (ang. *Maximum Mean De-Entropy*) Li i Tzenga (2009), wykorzystująca pojęcie entropii informacji. W kontekście upraszczania struktury całkowitego wpływu warto wspomnieć o propozycji Dytczaka (2010) oraz Chena i Changa (2010). Polega ona na zastosowaniu pojęcia wypadkowego – całkowitego wpływu netto do opisu rezultatów zastosowania metody. Taki wpływ wyraża macierz $\Delta\mathbf{T}$ o składowych wyznaczanych dzięki zastosowaniu następującej formuły:

$$\forall_{i=1,2,\dots,n} \quad \forall_{j=1,2,\dots,n} \quad \Delta t_{ij} = \begin{cases} t_{ij} - t_{ji} & \Leftrightarrow t_{ij} > t_{ji}, \\ 0 & \Leftrightarrow t_{ij} \leq t_{ji}. \end{cases} \quad (11)$$

W trakcie rozwoju metody zaproponowano także szereg sposobów wszechstronnej oceny elementów systemów. Z metodyki map poznawczych (ang. *cognitive maps*) zapożyczono następującą formułę do wyznaczania wektora wag z określających znaczenie elementów:

$$\mathbf{z} = (\mathbf{I} + \mathbf{T}) \mathbf{y}' \quad (12)$$

gdzie \mathbf{y} stanowi wektor znormalizowanych wag, opisujących wstępne preferencje poszczególnych elementów systemu.

Niewątpliwą niedogodnością powyższego sposobu jest konieczność wcześniejszego określenia składowych wektora \mathbf{y} wyrażających wstępne znaczenie elementów. W związku z tym opracowano szereg innych metod. Wykorzystują one wartości indywidualnych wskaźników s^+ i s^- oraz ich połączenie. Na przykład Dalalah (2009) zaproponował zastosowanie zależności:

$$z_i = \sqrt{(s_i^+)^2 + (s_i^-)^2} \quad (13)$$

Z uwagi na jakościowy charakter rezultatów otrzymywanych dzięki zastosowaniu metody DEMATEL wydaje się jednak, że bardziej wiarygodną ocenę znaczenia daje użycie wyspecjalizowanych metod, które są lepiej przystosowane do realizacji takich zadań.

Wśród udoskonaleń metody są także obecne oryginalne sposoby zmian w procedurze obliczeniowej i prezentacji jej rezultatów. Tseng (2009) zaproponował wariant metody nazwany EDEMATEL, umożliwiający sprzężenie 2 punktów widzenia w trakcie analizy rozważanego zagadnienia. Cel ten osiągnięto dzięki uwzględnieniu w pojedynczej macierzy \mathbf{X}^* informacji na temat bezpośredniego wpływu elementów systemu, wynikających z 2 niezależnych punktów widzenia na rozważane zagadnienie. W oryginalnej propozycji (Wu i inni 2011) jest wykorzystywana podwójna analiza, przeprowadzana w kontekstach ryzyka i korzyści. Otrzymane rezultaty są prezentowane na rozbudowanym, czteroćwiartkowym wykresie przyczynowym nazywanym *macierzą percepcji korzyści i ryzyka* (ang. *PB-PR matrix*). Oryginalny sposób prezentacji rezultatów zastosowania metody zaproponowali także Navid i Ismaeli (2012). Polega on na zastosowaniu czteroćwiartkowego wykresu zwanego *diagramem zależności między wpływem a powiązaniem czynników* (ang. *diagram of influential power-dependency*). Ilustruje i ułatwia on podział elementów systemu na 4 klasy: niezależne (autonomiczne); mało wpływowe, lecz silnie powiązane z pozostałymi elementami; elementy stanowiące tzw. *łączniki* (ang. *linkage factors*) oraz elementy mniej zależne, lecz bardziej wpływowe. Dytczak i Ginda (2009) przedstawili propozycję adaptacji metody do wielowymiarowych analiz. Wykorzystali w tym celu ważoną agregację zunitaryzowanych wartości wskaźników s^+ i s^- . Z kolei Falatoonitoosi i inni (2014) opracowali sposób pozwalający na uwzględnienie zróżnicowanego, wzajemnego wpływu wydzielonych grup elementów systemu.

Ostatnio Dou i Sarkis (2013) nawiązali do możliwości analizy podobieństwa i różnic między opiniami ekspertów. W odróżnieniu od oryginalnej propozycji Fonteli i Gabusa proponują oni jednak zastosowanie w tym celu struktur całkowitego wpływu wyznaczonych na podstawie opinii poszczególnych ekspertów.

Na zakończenie omawiania udoskonaleń metody warto zwrócić uwagę na możliwość reprezentowania struktury całkowitego wpływu przy pomocy *macierzy wewnętrznych powiązań* (ang. *inner dependence matrix – IDM*). Przyjmuje ona stochastycznie lewą postać $\bar{\mathbf{T}}$ i jest wyznaczana dzięki transpozycji wierszowo znormalizowanej macierzy \mathbf{T} :

$$\forall_{i=1,2,\dots,n} \quad \forall_{j=1,2,\dots,n} \quad \bar{t}_{ji} = \frac{t_{ij}}{\sum_{k=1}^n t_{kj}}. \quad (4-27)$$

Taka reprezentacja struktury całkowitego wpływu ułatwia sprzężenie metody DEMATEL z innymi narzędziami.

Poszerzanie funkcjonalności innych narzędzi Wprowadzenie

Przy poszerzaniu funkcjonalności różnych narzędzi przy użyciu metody DEMATEL wykorzystano dwa podstawowe sposoby:

1. Integracja mechanizmów metody w ramach tych narzędzi.
2. Umiejętne łączenie metody z innymi narzędziami.

W tym ostatnim przypadku możemy wykorzystać połączenie szeregowe lub równoległe metody z innymi narzędziami. W połączeniu szeregowym inne narzędzia mogą być wykorzystywane do dostarczenia danych niezbędnych do zastosowania metody DEMATEL lub korzystać z dostarczanych przez nią rezultatów. W ogólnym przypadku możemy więc mówić o zastosowaniu metody jako *procesora* służącego do przetwarzania informacji dostarczanych przez narzędzia, które pełnią funkcję *preprocesorów* (przetwarzających pierwotną informację związaną z rozważanym zagadnieniem). Narzędzia wykorzystujące wyniki zastosowania metody DEMATEL pełnią z kolei funkcję *postprocesorów* przetwarzających te rezultaty. Warto przy tym zauważyć, że zarówno preprocesor, jak i postprocesor może składać się z więcej niż jednego narzędzia. Takie narzędzia są zwykle połączone ze sobą szeregowo. Schemat przepływu informacji związanego z takim połączeniem przedstawia rys. 5.

Połączenie równoległe wiąże się z jednoczesnym zastosowaniem metody DEMATEL i innych narzędzi przy rozwiązywaniu tego samego zagadnienia. Zauważmy, że przedstawione 2 sposoby można stosować razem, np. wykorzystując równoległe z innymi narzędziami szeregowe połączenie DEMATELA z wybranymi preprocesorami i postprocesorami.

Integracja z narzędziami

DEMATEL okazał się użyteczną metodą poszerzającą możliwości istniejących narzędzi

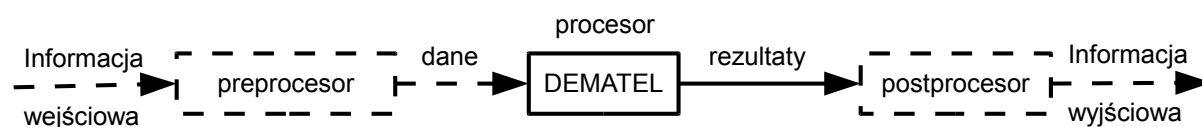
wspomagających podejmowanie decyzji w różnych dziedzinach:

1. Marketing oraz kształtowanie produktów i usług (Kansei, model Kano, KJ, *Importance-Performance Analysis* – IPA, *Importance-Performance & Gap Analysis* – IPGA, *Product-Service System* – PSS, *Importance-Satisfaction Analysis* – ISA).
2. Rozwój nowych i innowacyjnych produktów (*New Product Development* – NPD, *Patent Co-citation Analysis* – PCA, TRIZ).
3. Kształtowanie jakości produktów i usług (*Failure Mode and Effect Analysis* – FMEA, Lean SixSigma, *Quality Function Deployment* – QFD, Six Sigma, *Total Quality Management* – TQM).
4. Analiza i ocena efektów działalności i procesów (analiza kosztów i korzyści, zrównoważona karta wyników – BSC, DTPB, *LibQual*, macierz konkurencyjnego profilu, SERVQUAL, *Supply-Chain Operations Reference-model* – SCOR, SWOT).
5. Wspomaganie zarządzania w biznesie (*Activity Based Costing* – ABC, *Business Continuity Management* – BCM, *Business Impact Analysis* – BIA, *Business Process Reengineering* – BPR, *Corporate Social Responsibility* – CSR).
6. Analiza inwestycji (*Capital Asset Pricing Model* – CAPM, *F-Score*).
7. Analiza map poznawczych (ang. *Fuzzy Cognitive Map* – FCM), map decyzji (ang. *Fuzzy Decision Map* – FDM) oraz sieci społecznych (ang. *Social Network Analysis* – SNA).

Podstawową przyczynę takiej popularności metody stanowi możliwość modelowania złożonych zależności pomiędzy elementami systemu przy jednoczesnym uwzględnieniu trudnomierzalności ich wpływu. Szczególnie interesująco wygląda ostatnia z przedstawionych możliwości adaptacji metody. Okazuje się bowiem, że zastosowanie jej znacząco ułatwia analizę map poznawczych i map decyzji (Tzeng i inni 2010) oraz konstruowanie sieci Bayesa (Aung i Watanabe 2010).

Warte osobnego omówienia jest sprzężenie metody DEMATEL z Analizą Sieciową Procesów

Rys. 5. Schemat szeregowego połączenia narzędzi



Źródło: opracowanie własne.

(ang. *Analytic Network Process* – ANP) Saaty’ego (1996). Dla wykorzystania ANP jest konieczne określenie odpowiedniej, sieciowej struktury sterującej obliczeniami, umożliwiającej modelowanie sprzężeń między rozważanymi obiektami. W określaniu identyfikacji takiej struktury jest właśnie niezastąpiony DEMATEL. Podobieństwo środków (grafy, macierze, skale oceny) wykorzystywanych w obu metodach ułatwia ich sprzężenie. W efekcie wystarczy odpowiednie, automatyczne przekształcenie rezultatów zastosowania metody DEMATEL, aby można było z nich skorzystać w ANP. Łatwość integracji obu metod zaowocowała nowym narzędziem znanym pod nazwą DANP (oraz DNP) (Chen i Tzeng 2011). Obecnie to właśnie DANP często pełni funkcję procesora w przypadku zagadnień typowo rozwiązywanych przy pomocy metody ANP.

Wspólne zastosowania Połączenie szeregowo

Zestaw narzędzi złożony z metody DEMATEL, pełniącej funkcję procesora, oraz innych narzędzi służy do rozwiązywania 3 ogólnych rodzajów zadań:

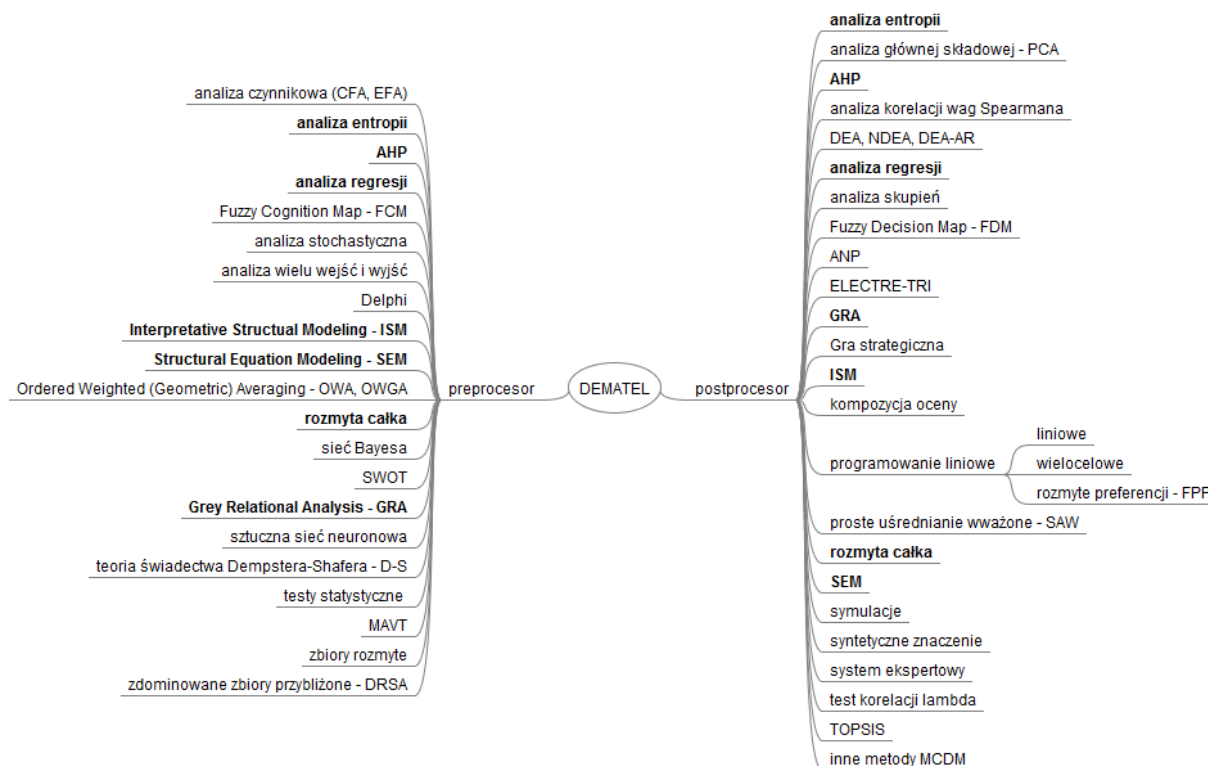
1. Identyfikacja powiązań czynników.

2. Ocena, rangowanie, wybór oraz sortowanie (i klasyfikacja) obiektów.
3. Zadania optymalizacyjne.

DEMATEL pełni przy tym jedną z dwóch funkcji. Funkcja standardowa polega na identyfikacji zależności między rozważanymi obiektami, a funkcja niestandardowa – na ważeniu obiektów. Na rys. 6 wymieniono zarówno narzędzia dostarczające bezpośrednio danych niezbędnych do wykorzystania metody, jak i narzędzia bezpośrednio korzystające z rezultatów jej zastosowania. Jak widać, mamy do czynienia ze znaczną liczbą takich narzędzi. Część z nich może pełnić obie te funkcje. Nazwy takich narzędzi wyróżniono na rys. 6 pogrubioną czcionką. Dynamicznie poszerzający się krąg zastosowań metody sprawia, że w przyszłości można się spodziewać wykorzystania kolejnych narzędzi w powyższych rolach.

W tabelach zamieszczonych w dalszej części pracy przedstawiono zestawy narzędzi wykorzystywane przy rozwiązywaniu różnych zadań: identyfikacji (zob. tab. 1), a także oceny (zob. tab. 2), rangowania (zob. tab. 3), wyboru (zob. tab. 4), sortowania i klasyfikacji obiektów (zob. tab. 5) oraz optymalizacji (zob. tab. 6). Kreski rozdzielające nazwy narzędzi sygnalizują ich sekwencyjne połączenie, a znak przecinka – ich niezależne (równoległe) wykorzystywanie.

Rys. 6. Narzędzia zasilające DEMATEL i zasilane przez DEMATEL w dane



Źródło: opracowanie własne.

W przypadku uniwersalnych narzędzi w nawiasie okrągłym podano, w jakim celu zostały one użyte. Zauważmy, że część narzędzi tworzących postprocesor korzysta z już przetworzonych wyników dostarczonych przez DEMATEL. Do takich narzędzi należą: **AHP** i **ANP**, analiza wrażliwości, **BOCR** (ang. *Benefits – Opportunities – Costs – Risks*) w ANP, **GRA**, **DEA**, Delphi, ELECTRE, kryterium Bordy, ocena Liberatore, metoda poziomu aspiracji oraz punktu idealnego, programowanie celowe, **rozmyta całka**, **SAW**, taksonomia numeryczna, **TOPSIS** i TL-TOPSIS (ang. *2-Tuple linguistic TOPSIS*), **VIKOR** (sr. *Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*), wielowymiarowe skalowanie (ang. *Multi-Dimensional Scaling – MDS*) oraz **zbiory rozmyte**. Pogrubioną czcionką wyróżniono powyżej narzędzia, które także korzystają bezpośrednio z wyników zastosowania metody.

Z zawartości tabel wynika, że jedynie w przypadku rozwiązywania zagadnień identyfikacji oraz sortowania i klasyfikacji mamy do czynienia z dużym udziałem preprocesorów w zestawach narzędzi. W przypadku pozostałych zagadnień udział ten jest stosunkowo niewielki, co świadczy o niewielkich potrzebach wstępnego przetworzenia informacji wejściowej na potrzeby metody DEMATEL. W prawie wszystkich przypadkach zagadnień zaznacza się duży udział postprocesorów. Wyjątkiem jest zagadnienie identyfikacji, gdyż jest to typowe zastosowanie metody.

Równoległe przetwarzanie danych

Warto zauważyć, że niektóre spośród zestawów narzędzi przedstawionych w tab. 1–5 są również niezależnie wykorzystywane do rozwiązywania tych samych zagadnień. Przykładem jest zastosowanie w trakcie rangowania obiektów:

- preprocesora złożonego z metody Delphi, a następnie niezależnie zastosowanych: metody SEM oraz analizy czynnikowej CFA i EFA;
- procesora realizującego standardową procedurę metody DEMATEL;
- postprocesora złożonego z niezależnie zastosowanych metod: SAW, TOPSIS oraz VIKOR.

Inne przypadki równoległego zastosowania zestawów dotyczą niezależnego wykorzystania

postprocesorów. Na przykład w celu oceny obiektów można skorzystać z równoległe użytych metod ANP i SEM, wykorzystujących rezultaty standardowego zastosowania metody DEMATEL, lub porównać oceny uzyskane przy pomocy niezależnego użycia DNP i SEM. Do wyboru obiektów są również równoległe wykorzystywane: połączenie standardowej wersji analizy wykonanej przy użyciu metody DEMATEL i ANP oraz analiza przy użyciu ANP.

Równoległe wykorzystanie metody DEMATEL dotyczy także przypadków jej samodzielnego użycia. Rezultaty jej zastosowania są porównywane z wynikami uzyskanymi za pomocą innych narzędzi. Na przykład w trakcie oceny obiektów równoległe są wykorzystywane: AHP i ANP, rozmyta całka, a także analiza skupień, którą poprzedza i po której następuje zastosowanie AHP. Rezultaty zastosowania metody DEMATEL do ważenia obiektów w celu ich rangowania są z kolei porównywane z wynikami uzyskanymi za pomocą TOPSIS i innych metod. Przykładowo Dytczak i Ginda (2009) zaproponowali równoległe zastosowanie metody DEMATEL z 3 innymi metodami: AHP, unitaryzacji zerowanej i taksonomii numerycznej wrocławskiej (dostarczającej informacji o skupieniach obiektów). Do określenia niezbędnych danych wykorzystano AHP.

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przedstawionych informacji można stwierdzić, że metoda DEMATEL stanowi wiarygodne i pełne zalet narzędzie wspomagania decyzji. O jej atrakcyjności świadczą liczne zastosowania praktyczne. Co więcej, zastosowania te przyczyniają się do dynamizacji rozwoju metody wskutek jej przystosowywania do wspomagania decyzji w kolejnych dziedzinach. Popularność metody wynika z jej zalet, w tym zwłaszcza elastyczności, dzięki której jest wykorzystana na różne sposoby. W ten sposób pozostałe zalety metody, a wśród nich przede wszystkim czytelność i prostota zasad przy modelowaniu złożonych zależności między elementami rozważanych systemów, mogą zostać w pełni wykorzystane przy rozwiązywaniu zagadnień decyzyjnych o charakterze nietypowym dla samodzielnego zastosowania metody DEMATEL i wykorzystywanych z nią wspólnie narzędzi.

Tabela 1. Zestawy narzędzi stosowane przy rozwiązywaniu zagadnień identyfikacji

Preprocesor	Procesor	Postprocesor
analiza czynnikowa	standard	-
analiza regresji	standard	-
Delphi	standard	-

Delphi, ISM	standard	-
Intuicyjne zbiory rozmyte IFS – D-S	standard	-
GRA (wybór)	standard	-
GRA (ocena)	standard	-
ISM	standard	-
sieć bayesowska	standard	-
test dwumianowy	standard	-
zdominowane zbiory przybliżone DRSA	standard	-
-	standard	ANP – GRA (korelacja)
-	standard	ISM

[Źródło: opracowanie własne]

Tabela 2. Zestawy narzędzi stosowane przy rozwiązywaniu zagadnień oceny obiektów

Preprocesor	Processor	Postprocesor
SWOT	ważenie	-
zbiory rozmyte II rodzaju (obliczenia perceptualne)	ważenie	-
-	standard	analiza entropii
-	ważenie	analiza regresji
-	ważenie	AHP
-	standard	ANP
analiza entropii	standard	ANP
-	standard	SEM
-	standard	ANP (ocena mierników) – AHP (ocena kryteriów) – GRA
-	standard	ANP – DEA
-	standard	ANP – GRA
-	standard	ANP – ocena Liberatore
-	standard	ANP – SAW
-	standard	ANP – VIKOR
-	standard	ANP – wielowymiarowe skalowanie MDS
-	standard	DANP – VIKOR
test Kołmogorowa-Smirnowa	standard	DSS z regułami Mamdamiego
-	standard	ISM (identyfikacja struktury)
-	standard	korelacja lambda (zależności) – ANP
-	standard	PCA
-	standard	rozmyta całka (ocena czynników) – AHP
-	standard	sieciowa DEA (NDEA)
-	standard	symulacje
-	DNP	rozmyta całka (agregacja)
-	DANP	GRA (ocena)
-	DANP	poziom aspiracji
-	DANP	ocena Liberatore
-	DANP	rozmyta całka
-	DANP	SAW (ocena) – rozmyta całka (agregacja)
-	DANP	VIKOR

[Źródło: opracowanie własne]

Tabela 3. Zestawy narzędzi stosowane przy rozwiązywaniu zagadnień rangowania

Preprocesor	Processor	Postprocesor
OWA lub OWGA	standard	-
-	standard	analiza korelacji rang Spearmana
-	standard	ANP – GRA

Delphi	standard	ANP – GRA
-	standard	ANP – VIKOR
-	ważenie	ANP – VIKOR
Delphi	standard	ANP – VIKOR
-	standard	ANP – VIKOR – analiza wrażliwości
SWOT	standard	ANP – VIKOR, TOPSIS
-	ważenie	DEA-AR
-	DANP	GRA
-	standard	kompozycja oceny
-	ważenie	MCDM (prawdopodobieństwo powodzenia)
-	standard	PCA (kategoryzacja) – ANP – VIKOR
-	standard	rozmyta całka (agregacja)
Delphi – SEM, CFA, EFA	standard	SAW
Delphi – SEM, CFA, EFA	standard	TOPSIS
Delphi – SEM, CFA, EFA	standard	VIKOR
-	ważenie	TOPSIS
-	ważenie	TOPSIS – analiza wrażliwości

[Źródło: opracowanie własne]

Tabela 4. Zestawy narzędzi stosowane przy rozwiązywaniu zagadnień wyboru

Preprocesor	Procesor	Postprocesor
-	ważenie	AHP
analiza entropii	standard	AHP
-	ważenie	AHP (modyfikacja wag) – Delphi (ocena)
-	standard	ANP – BOCR
-	standard	ANP – GRA
-	standard	ANP – IFS – punkt idealny
-	standard	ANP – programowanie celowe
-	ważenie	ANP – programowanie celowe – analiza wrażliwości
-	standard	ANP – rozmyta całka (ocena) – TOPSIS – analiza wrażliwości
-	standard	ANP – TL-TOPSIS
-	standard	ANP – TOPSIS
-	standard	ANP – VIKOR
Delphi	standard	ANP – VIKOR (ranking) – GRA
-	DANP	GRA (ocena)
-	DNP	Poziom aspiracji
-	standard	programowanie preferencji (agregacja) – ANP
-	ważenie	programowanie wielocelowe
-	standard	ANP – rozmyta całka (ocena) – TOPSIS (ranking) – analiza wrażliwości
-	ważenie	rozmyta całka (ranking) – wielocelowa optymalizacja
-	standard	ANP
-	standard	SAW
-	ważenie	TOPSIS
-	DANP	TOPSIS
-	standard	TOPSIS (modyfikacja wag)
-	DANP	VIKOR
rozmyta całka	DANP	VIKOR

[Źródło: opracowanie własne]

Tabela 5. Zestawy narzędzi stosowane przy rozwiązywaniu zagadnień sortowania i klasyfikacji

Preprocesor	Procesor	Postprocesor
-	standard	analiza skupień

-	standard	AHP (wybór zbioru) – ELECTRE (sortowanie)
Delphi	standard	GRA (identyfikacja powiązań) – analiza skupień
FCM	standard	analiza skupień (redukcja FCM)
IFS	standard	ELECTRE-TRI (klasyfikacja)
Delphi	standard	GRA (sortowanie)

[Źródło: opracowanie własne]

Tabela 6. Zestawy narzędzi stosowane przy rozwiązywaniu zagadnień optymalizacji

Preprocesor	Processor	Postprocesor
-	standard	ANP – GRA (rangowanie – optymalizacja organizacji przedsięwzięcia)
-	standard	ANP – programowanie liniowe (optymalizacja organizacji przedsięwzięcia)
-	standard	ANP – programowanie celowe (optymalizacja przydziału)
-	standard	ANP (prawdopodobieństwo) – OWA (agregacja)
Delphi	ważenie	mieszane programowanie liniowe MILP (identyfikacja optymalnego składu)
-	standard	programowanie liniowe (identyfikacja optymalnego składu), kryterium Bordy
analiza wielu wejść i wielu wyjść (transformacja do modelu MCDM)	ważenie	VIKOR (optymalizacja parametrów procesu)
-	standard	wartość Shapleya – programowanie celowe (identyfikacja kluczowych działań)

[Źródło: opracowanie własne]

Bibliografia

Aung Z.Z., Watanabe K. (2010), *Modeling Inoperability Propagation Using Bayesian Networks*, w: *Critical Infrastructure Protection IV, IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol.342, pp. 199–212

Chen F.-H., Hsu T.-S., Tzeng G.-H. (2011), *A balanced scorecard approach to establish a performance evaluation and relationship model for hot spring hotels based on a hybrid MCDM model combining DEMATEL and ANP*, „International Journal of Hospitality Management”, vol.30(4), pp. 908–932.

Chen P.-Y., C.-C. Chang (2010), *The analysis of service acceptance framework for social games based on extensive technology acceptance model [w:] Proceedings of PICMET '10: Technology Management for Global Economic Growth (PICMET)*, pp. 1–11.

Chen S.-J., Hwang C.-L. (1992), *Fuzzy MADM*, Springer.

Dalalah D. (2009), *A hybrid DEMATEL-TOPSIS Multi-Criteria Decision Making model [w:] IRI '09. IEEE International Conference on Information Reuse & Integration*, pp. 428–430.

Dou Y., Sarkis J. (2013), *A multiple stakeholder perspective on barriers to implementing China RoHS regulations*, „Resources, Conservation and Recycling”, vol.81, pp. 92–104.

Dytczak M. (2010), *Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie*, Politechnika Opolska, Opole.

Dytczak M., Ginda G. (2009), *Identification of Building Repair Policy Choice Criteria Role, „Technological and Economic Development of Economy” (TEDE)*, vol.15(2), pp. 213–228.

Dytczak M., Ginda G. (2013), *Is explicit processing of fuzzy direct influence evaluations in DEMATEL indispensable?*, „Expert Systems with Applications”, vol.40(12), pp. 5027–5032.

Dytczak M., Ginda G. (2010), *Struktury danych do wielokryterialnej oceny obiektów z równoległym użyciem wielu metod MCDA [w:] Ewaluacja rozwoju regionu w wymiarze społecznym, gospodarczym i środowiskowym. 10 lat Wydziału Zarządzania i Inżynierii Produkcji Politechniki Opolskiej*, red. Malik K., Politechnika Opolska, Opole, s. 105–118.

Falatoonitoosi E., Ahmed S., Sorooshian S. (2014): *Expanded DEMATEL for Determining Cause and Effect Group in Bidirectional Relations*, „The Scientific World Journal” [article ID:103846, doi:10.1155/2014/103846].

Fontela E., Gabus A. (1976), *Current perceptions of the world problematique* [w:] *World Modelling: a Dialogue*, Eds. Churchman C.W., Mason R.O., North Holland/Elsevier, Amsterdam, New York, pp. 81–87.

Fontela E., Gabus A. (1976a), *DEMATEL Observer, DEMATEL 1976 Report*, Batelle Geneva Research Institute, Geneva, Switzerland.

Lee H.-S., Tzeng G.-H., Yeih W., Wang Y.-J., Yang S.-C. (2013), *Revised DEMATEL: Resolving the Infeasibility of DEMATEL*, „Applied Mathematical Modelling”, vol.37(10–11), pp. 6746–6757.

Mizuyama H., Ishida K. (2007), *Systematic Decision Making Process for Identifying the Contradictions to be Tackled by TRIZ to Accomplish Product Innovation*, „Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems”, vol.1(4), pp. 21–29.

Navid B.J., Ismaeli S. (2012), *Analyzing effective elements in agile supply chain*, „Management Science Letters”, vol.2(1), pp. 369–378.

Opricovic S., Tzeng G.-H. (2003), *Defuzzification within a Multicriteria Decision Model*, „International Journal of Uncertainty, Fuzziness

and Knowledge-based Systems – IJUFKS”, vol.11(5), pp. 635–652.

Saaty T.L., Tran L.T. (2007), *On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process*, „Mathematical and Computer Modelling”, vol.46(7–8), pp. 962–975.

Li C.-W., Tzeng G.-H. (2009), *Identification of a threshold value for the DEMATEL method using the maximum mean de-entropy algorithm to find critical services provided by a semiconductor intellectual property mall*, „Expert Systems with Applications”, vol.36, pp. 9891–9898.

Tseng M.-L. (2009), *Using the extension of DEMATEL to integrate hotel service quality perceptions into a cause–effect model in uncertainty*, „Expert Systems with Applications”, vol.36(5), pp. 9015–9023.

Tzeng G.-H., Chen W.-H., Yu R., Shih M.-L. (2010), *Fuzzy decision maps: a generalization of the DEMATEL methods*, „Soft Computing”, vol.14(11), pp. 1141–1150.

Wu W.-W., Lan L.W., Lee Y.-T. (2011), *Exploring decisive factors affecting an organization’s SaaS adoption: A case study*, „International Journal of Information Management”, vol.31(6), pp. 556–563.

Zhü K. (2014), *Fuzzy analytic hierarchy process: Fallacy of the popular methods*, „European Journal of Operational Research”, vol.236(1), pp. 209–217.

DEMATEL in resolving complex decision tasks

Abstract

DEMATEL was developed in the early 1970s to provide necessary means for identification of roles played by cause-effect chain system components. The method was initially applied to identify the nature of contemporary world’s economic, social, and environmental problems. The method’s merits made it popular again at the beginning of the new century. The range of method’s applications extended a lot. The contemporary applications of the method deal with complex problems which are totally different from its original purpose. The method proves to be a useful tool for providing necessary data for other approaches. It can also benefit from the application of other approaches. The method is utilized to extend numerous decision and management support approaches as well. A review of such applications of the method are discussed in the paper.

Keywords: DEMATEL, development, application, complex decision support, management