XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje 24-27 maja 2011
awarie budowlane 2011

MIROSŁAW DYTCZAK, *mdytczak@gmail.com*
GRZEGORZ GINDA, *gginda@gmail.com*
Politechnika Opolska
TOMASZ WOJTKIEWICZ, *t.wojtkiewicz@wp.pl*
WACETOB Sp. z o.o.

ANALIZA ZWIĄZKÓW PRZYCZYNOWO-SKUTKOWYCH W AWARII KONSTRUKCJI PRZY UŻYCIU METODY DEMATEL

APPLICATION OF DEMATEL FOR IDENTIFICATION OF CAUSE-EFFECT RELATIONS IN THE CASE OF FAILURE ANALYSIS

Streszczenie Współczesne budynki i budowle stanowią złożone obiekty techniczne. Ich złożoność manifestuje się na różne sposoby. W przypadku wystąpienia awarii, skomplikowany charakter obiektów budowlanych powoduje, że do wyjaśnienia jej przyczyn i mechanizmów konieczne jest przeprowadzenie wnikliwej analizy związków przyczynowo-skutkowych, zachodzących pomiędzy czynnikami, warunkującymi sprawne funkcjonowanie obiektów. W pracy przedstawiono możliwości zastosowania metody DEcision MAking Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) do identyfikacji elementów łańcucha przyczynowo-skutkowego awarii obiektów budowlanych. Zilustrowano je załączonym przykładem obliczeniowym.

Abstract Contemporary building objects comprise complex technical objects. Explanation of building failure causes and modes requires application of a thorough analysis to identify all important cause effect relations be-tween factors which influence proper building functioning. A possibility of application of sample decision support method for identification of cause-effect chain components for building object failure is discussed. DEcision MAking Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) method is applied with this regard. Sample analysis confirms its usefulness.

1. Wprowadzenie

Zapewnienie oczekiwanej zdatności technicznej obiektu budowlanego wymaga zastosowania właściwych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Stosowane różne układy konstrukcyjne, materiały i wyposażenie powinny tworzyć harmonijny system, umożliwiający prawidłowe funkcjonowanie obiektu. Ponadto, w proces projektowania, wznoszenia oraz eksploatacji obiektów budowlanych zaangażowanych jest szereg czynników o zróżnicowanej, technicznej, losowej i ludzkiej naturze.

Powyższa złożoność skutkuje trudnościami diagnostyki. Obecność tak zróżnicowanych czynników, w dodatku pojawiających się na różnych etapach kształtowania obiektów, powoduje, że szczególnie trudna staje się analiza przyczyn i mechanizmów awarii, wynikających z technicznego charakteru obiektów budowlanych. W takim przypadku, celowe staje się wykorzystanie odpowiednich narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji, pozwalających na właściwe oddanie złożoności relacji między czynnikami, warunkującymi prawidłowe funkcjonowanie rozpatrywanego obiektu.

W pracy wykorzystano w tym celu wybrane narzędzie wspomagania decyzji, którego zastosowanie pozwala na obiektywizację wyniku analizy związków przyczynowo skutkowych towarzyszących awariom obiektów budowlanych. Autorzy referatu podejmując tę problematykę mają nadzieję, że wskazanie metody i opracowanie odpowiednich algorytmów pozwoli w przyszłości na eliminację wielu przyczyn awarii i katastrof budowlanych, zwłaszcza w odniesieniu do innowacyjnych rozwiązań i nowych konstrukcji budowlanych.

2. Opis konstrukcji przekrycia zbiornika i jego zniszczenia

Rozpatrywana konstrukcja ma formę pierścieniowej łupiny, uformowanej przez fale o zmiennym, na swej długości, przekroju. Została ona wykonana z tworzywa sztucznego. Do awarii doszło w okresie zimowym. Forma zniszczenia konstrukcji wskazuje na lokalną utratę stateczności, doprowadzającą do zerwania przekroju, jako wysoce prawdopodobną przyczynę zniszczenia. Zaobserwowane symptomy zniszczenia są więc charakterystyczne dla materiału kruchego (rys. 1).

Rys. 1. Konstrukcja po awarii (zdjęcia z wizji lokalnej)

Analiza założeń obliczeniowych, przyjętych w trakcie projektowania konstrukcji, nie ujawniła nieprawidłowości związanych z wykorzystanym modelem matematycznym konstrukcji, charakterystykami materiału i obciążeniami, które mogłyby istotnie wpłynąć na bezpieczeństwo konstrukcji. Nie zauważono także żadnych istotnych odstępstw od projektu w trakcie montażu konstrukcji. W wyniku badań próbek materiału konstrukcji okazało się jednak, że charakteryzuje go znacząco (blisko 40%) niższa, w porównaniu z przyjętą w projekcie, wartość modułu sprężystości Younga. Wyniki obliczeń wykonanych przy wykorzystaniu projektowego modelu obliczeniowego i rzeczywistych wartości charakterystyk materiałowych ujawniły, że gorsze parametry materiału mogły rzeczywiście spowodować blisko dwukrotnie większe przemieszczenia konstrukcji. Takie ugięcia mogły z kolei doprowadzić do utraty stateczności konstrukcji, a w efekcie jej zniszczenia [1].

Oprócz ustalenia najbardziej prawdopodobnej przyczyny zniszczenia konstrukcji, równie cenne, z uwagi na aspekt poznawczy, może być zidentyfikowanie związków przyczynowo-skutkowych, związanych z awarią konstrukcji. W ten sposób można bowiem określić bezpośrednie przyczyny awarii, a także strukturę zależności między nimi a ich skutkami.

Poniżej scharakteryzowano wybraną metodę wspomagania decyzji, umożliwiającą identyfikację łańcuchów przyczynowo-skutkowych.

3. Wybrana metoda wspomagania decyzji – DEMATEL

DEMATEL stanowi jedną ze starszych metod wspomagania decyzji [2]. Zasadniczo, służy ona identyfikacji związków przyczynowo-skutkowych, związanych ze złożonymi zagadnieniami decyzyjnymi. Przez lata stanowiła ona niemal całkowicie zapomniane, jedynie z rzadka stosowane narzędzie wspomagania decyzji. Przełom pod tym względem przyniosły lata 90. ubiegłego oraz początkowe bieżącego stulecia. Obszar zastosowań metody uległ w tym czasie znaczącemu poszerzeniu. Pozwoliła na to szczególnie rozbudowa metody o uwzględnianie aspektu wieloatrybutowości [3]. Zasady stosowania metody zostały obszernie omówione w pracy [4].

Przegląd przykładów zastosowań metody można znaleźć także w pracy [4]. W zagadnieniach technicznych użyto DEMATEL do: projektowania interfejsu układów urządzeń kontrolnych, aplikacji komputerowych, oceny jakości i identyfikacji źródeł zanieczyszczeń zasobów wodnych, oraz wyboru modeli urządzeń technicznych. Metodę wykorzystano także w budownictwie do identyfikacji roli kryteriów kształtowania polityki remontowej budynków mieszkalnych w pracy [5].

Podstawę metody stanowią porównania rozpatrywanych obiektów parami. Obiektami są zazwyczaj rozpatrywane czynniki, warianty decyzji, zdarzenia. Porównań dokonuje się, mając na uwadze wpływ (*ang. influence*) porównywanych obiektów na siebie. Dzięki rozpatrzeniu kompletu relacji, zachodzących pomiędzy porównywanymi obiektami, można zbudować graf bezpośredniego wpływu (*ang. direct influence graph*), obrazujący relacje pomiędzy nimi. Jego wierzchołki reprezentują rozpatrywane obiekty, a łuki relacje przyczynowo-skutkowe (relacje wpływu) między nimi. W ogólności jest możliwe uwzględnianie sprzężeń w ramach par porównywanych obiektów.

Do oceny intensywności relacji wpływu wykorzystywana jest porządkowa, dyskretna skala, złożona z poziomów 0-N. Zwykle przyjmuje się skalę o wartości parametru $N = 3$, z poziomami o następującym znaczeniu:

0 – brak wpływu pierwszego, z porównywanych obiektów, na drugi.
1 – niewielki wpływ pierwszego, z porównywanych obiektów, na drugi.
2 – bardzo duży wpływ pierwszego, z porównywanych obiektów, na drugi.
3 – ekstremalny wpływ pierwszego, z porównywanych obiektów, na drugi.

Taka postać skali ocen pozwala uwzględniać wpływ czynników trudno mierzalnych.

W dalszych działaniach wykorzystuje się macierzową reprezentację grafu nazywaną macierzą bezpośredniego wpływu (**A**). Jej poszczególne wiersze są dedykowane obiektom, występującym w porównaniach jako pierwsze, zaś kolumny — obiektom, występującym w porównaniach jako drugie.

Na podstawie macierzy bezpośredniego wpływu wyznaczana jest macierz całkowitego wpływu **T** (*ang. total influence matrix*). Dokonuje się tego, normalizując w pierwszym kroku macierz **A** i uzyskując w wyniku macierz **X**. Zwykle służy temu dzielenie elementów macierzy bezpośredniego wpływu przez największą sumę wierszową jej elementów:

$$\mathbf{X} = \frac{\mathbf{A}}{\max_i \left\{ \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \right\}} \tag{1}$$

Macierz całkowitego wpływu **T** uzyskuje się dzięki dodaniu do siebie kolejnych potęg macierzy **X**. Wynik tej operacji opisuje formuła:

$$\mathbf{T} = \mathbf{X} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{X})^{-1} \tag{2}$$

Na podstawie macierzy **T** można wyznaczyć relacje pomiędzy rozpatrywanymi obiektami w kontekście wpływu całkowitego, obejmującego zarówno składnik bezpośredni, jak i pośredni. Służą temu wartości wskaźników pozycji (s^+) oraz relacji (s^-). Są one wyznaczane na podstawie sum i różnic wartości sum wierszowych i kolumnowych macierzy. W przypadku i-tego obiektu otrzymujemy:

$$\begin{aligned} s_i^+ &= R_i + C_i, \\ s_i^- &= R_i - C_i, \end{aligned} \tag{3}$$

gdzie: R_i i C_i oznaczają odpowiednio wartości sumy elementów: wiersza i kolumny dedykowanej i-temu obiektowi.

Wskaźnik pozycji wyraża rolę (aktywność) obiektu w procesie porównań parami. Wskaźnik relacji ogólny charakter obiektu. Wartość dodatnia świadczy o jego ogólnej roli jako przyczyny, natomiast ujemna o wypełnianej przezeń roli ogólnego skutku.

Umiejscowienie obiektów w łańcuchu przyczynowo-skutkowym można zidentyfikować na podstawie wartości netto ich całkowitego wpływu. W tym celu rozpatruje się różnice całkowitego wpływu na siebie poszczególnych obiektów, rozpatrywanych parami. Wartości netto całkowitego wpływu i-tego obiektu na j-ty obiekt odpowiada różnica między wpływem całkowitego wpływu i-tego obiektu na j-ty obiekt a całkowitym wpływem j-tego obiektu na i-ty obiekt:

$$\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{ji} \tag{4}$$

Dodatnia wartość powyższej różnicy odpowiada roli i-tego obiektu jako przyczyny, zaś ujemna jako skutku wystąpienia obiektu j-tego.

Przyczynowo-skutkowe zależności między czynnikami można przedstawić w graficzny sposób. Służy temu mapa wpływu. Otrzymuje się ją na podstawie dodatnich wartości (4), otrzymanych dla kompletu czynników. Czynniki wyrażają wierzchołki grafu, a relacje wpływu łuki, skierowane od wierzchołka przyczyny do wierzchołka jego skutku. Przykład mapy wpływu przedstawiono w końcowej części referatu.

4. Analiza związków przyczynowo-skutkowych awarii przekrycia zbiornika

W celu identyfikacji związków między przyczynami i skutkami awarii przekrycia za pomocą metody DEMATEL, posłużono się modelem obliczeniowym, który opisano poniżej. Rolę obiektów pełnią w nim zdarzenia:

1. Związane z decyzjami podmiotów, zaangażowanych w projektowanie i wykonawstwo konstrukcji.
2. Zachodzące w otoczeniu, niezależne od powyższych podmiotów.
3. Związane z cechami oraz zachowaniem materiału i konstrukcji.

W pierwszej grupie wyróżniono decyzje trzech podmiotów: projektanta (P), inwestora (I) i wykonawcy (W). Przedstawicielem drugiej grupy zdarzeń jest innowacyjny charakter konstrukcji (T). W grupie trzeciej wyróżniono następujące zdarzenia:

1. Bardziej niekorzystne niż w projekcie, wartości i układ obciążenia konstrukcji (O).
2. Występowanie niedostatecznej sztywności konstrukcji (E).
3. Utratę stateczności konstrukcji (S).
4. Przekroczenie stanów granicznych konstrukcji (N).
5. Awarię konstrukcji (A).

Do oceny wpływu poszczególnych zdarzeń użyto skali dla $N_D = 3$. Poniżej przedstawiono przyjęte poziomy bezpośredniego wpływu poszczególnych zdarzeń. Pominięto przy tym (zerowe) oceny relacji, które odpowiadają brakowi bezpośredniego wpływu.

Nowatorski charakter zastosowanego rozwiązania przekrycia ma:

1. Bardzo duży na wpływ decyzje projektanta (ocena relacji znaczenia 3).
2. Niewielki wpływ na decyzje inwestora (ocena 1).
2. Duży wpływ na decyzje wykonawcy (ocena 2).
4. Bardzo duży wpływ na oszacowanie sztywności konstrukcji (ocena 3).

W odniesieniu do projektanta przyjęto:

1. Niewielki bezpośredni wpływ na decyzje inwestora (ocena 1).
2. Duży bezpośredni wpływ na decyzje wykonawcy (ocena 2).
3. Bardzo duży bezpośredni wpływ na oszacowanie poziomu i sposobu przyłożenia obciążenia oraz sztywności konstrukcji (oceny równe 3).
4. Duży wpływ na przekroczenie stanów granicznych nośności konstrukcji (ocena 2).

Założono, że bezpośredni wpływ inwestora występuje na poziomie:

1. Wysokim w odniesieniu do projektanta (ocena 2).
2. Bardzo wysokim w stosunku do wykonawcy (ocena 3).
3. Wysokim w odniesieniu do kształtowania sztywności konstrukcji (ocena 2).

Przyjęto następujące poziomy bezpośredniego wpływu wykonawcy:

1. Niewielki na decyzje inwestora (ocena 1).
2. Duży na obniżenie sztywności konstrukcji (ocena 2).

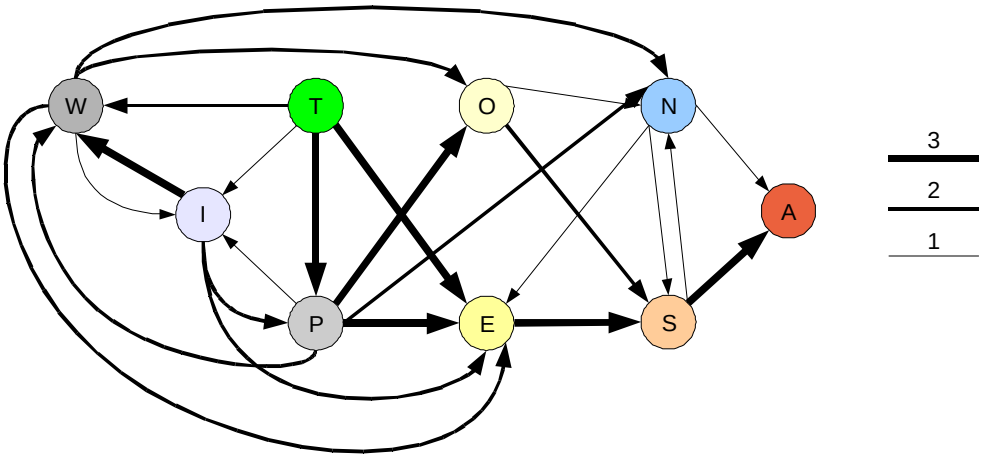
Rozpatrując bezpośredni wpływ niedostatecznej sztywności przyjęto, że jest on bardzo duży w odniesieniu do utraty stateczności konstrukcji (ocena 3).

Założono, że sposób i wartość obciążenia konstrukcji powoduje bezpośrednio utratę stateczności (ocena relacji równa 2), a także, w występujących warunkach, w mniejszym stopniu (ocena 1) wpływa na przekroczenie stanów granicznych nośności konstrukcji.

W rozpatrywanych warunkach utrata stateczności może być (jedynie we względnie małym stopniu) bezpośrednią przyczyną przekroczenia stanów granicznych nośności konstrukcji (ocena równa 1), a w bardzo dużym stopniu przyczyną awarii (ocena 3). Przekroczenie stanów granicznych nośności konstrukcji wpływa natomiast bezpośrednio (w niewielkim stopniu) na zmniejszenie jej sztywności, utratę jej stateczności i wystąpienie jej awarii (oceny równe 1).

Awaria konstrukcji jest końcowym, pewnym, zdarzeniem. Dlatego też pozostaje ona zdecydowanie skutkiem pozostałych zdarzeń.

Z powyższych założeń wynikają postaci grafu oraz macierzy bezpośredniego wpływu. Przedstawiono je na rys. 2 oraz w postaci formuły (5). Zróżnicowanie grubości łuków w grafie na rys. 2 pozwala oddać zróżnicowanie ocen relacji bezpośredniego wpływu. Kolejne wiersze i kolumny macierzy (5) odpowiadają obiektom, wyszczególnionym w kolejności: T, I, P, W, E, O, S, N, A.



Rys. 2. Graf bezpośredniego wpływu dla rozpatrywanego zagadnienia decyzyjnego

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 3 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 3 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 3 & 3 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

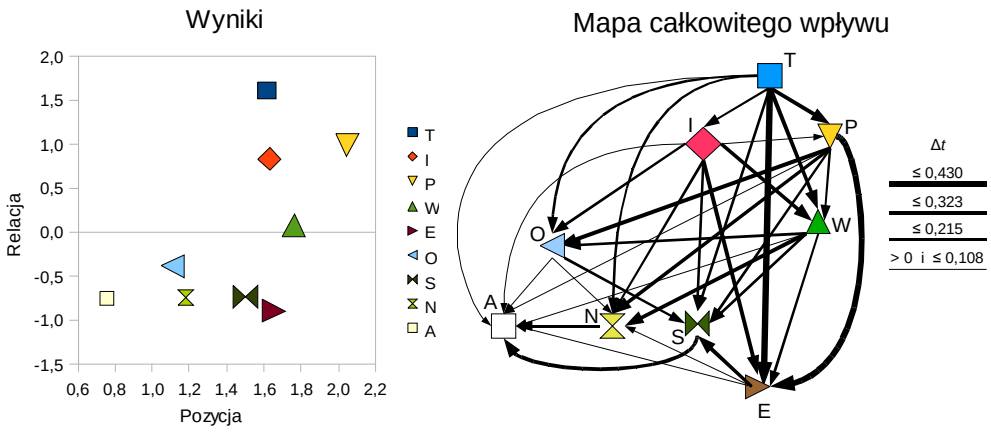
W wyniku zastosowania DEMATEL otrzymano postać macierzy całkowitego wpływu **T** (6). Odpowiada jej zestaw wartości sum wierszowych (R_i) i kolumnowych (C_i) oraz wskaźników pozycji i relacji, zamieszczony w tab. 1. Graficzną prezentację wyników ujęto na rys. 3 zarówno w postaci dwuwymiarowego wykresu w układzie wskaźników s^+ i s^-, jak i mapy całkowitego wpływu (grubościami łuków oddano intensywność przyczynowości w ramach poszczególnych par zdarzeń).

Z uzyskanych wyników płyną następujące wnioski. Najwyższa wartość wskaźnika relacji, osiągnięta w przypadku czynnika pionierskiej technologii (T) świadczy o jego dominującej roli jako przyczyny awarii przekrycia zbiornika. Wysokie wartości tego wskaźnika notują także czynniki związane z decyzjami projektanta (P) i inwestora (I), co sugeruje ich wpływ na wystąpienie awarii. Wobec neutralnej, bliskiej zeru, wartości wskaźnika, otrzymanej dla czynnika decyzji wykonawcy można uznać, że nie ma on ani specjalnego znaczenia jako przyczyna awarii, ani jako skutek — przedmiot oddziaływania innych czynników. Ujemne wartości wskaźnika relacji dla pozostałych czynników świadczą o ich zdecydowanie skutkowym charakterze. Jest to szczególnie widoczne w przypadku obniżenia sztywności konstrukcji (E).

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0{,}1431 & 0{,}2987 & 0{,}2752 & 0{,}4302 & 0{,}1315 & 0{,}1531 & 0{,}1302 & 0{,}0536 \\ 0 & 0{,}0464 & 0{,}1903 & 0{,}3200 & 0{,}3003 & 0{,}1101 & 0{,}1122 & 0{,}1130 & 0{,}0409 \\ 0 & 0{,}1124 & 0{,}0204 & 0{,}2162 & 0{,}3381 & 0{,}3176 & 0{,}1744 & 0{,}2696 & 0{,}0721 \\ 0 & 0{,}0951 & 0{,}0173 & 0{,}0291 & 0{,}2091 & 0{,}1918 & 0{,}1117 & 0{,}2178 & 0{,}0503 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}2750 & 0{,}0250 & 0{,}0773 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}1917 & 0{,}1083 & 0{,}0621 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}0083 & 0{,}0917 & 0{,}2833 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}0917 & 0{,}0083 & 0{,}1167 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Tablica 1. Wartości sum wierszowych i kolumnowych macierzy T oraz wskaźników s^+, s^-

i	Czynnik	Sumy		Wskaźniki	
		R_i	C_i	s_i^+	s_i^-
1	T	1,6156	0	1,6156	1,6156
2	I	1,2330	0,3970	1,6300	0,8360
3	P	1,5208	0,5267	2,0476	0,9941
4	W	0,9223	0,8404	1,7627	0,0819
5	E	0,3773	1,2777	1,6550	-0,9005
6	O	0,3621	0,7510	1,1131	-0,3889
7	S	0,3833	1,1181	1,5014	-0,7348
8	N	0,2167	0,9639	1,1806	-0,7473
9	A	0	0,7562	0,7562	-0,7562



Rys. 3. Ostateczne wyniki analizy

Powyższe spostrzeżenia potwierdza otrzymana postać mapy całkowitego wpływu. Wynika z niej następujące uporządkowanie kolejność zdarzeń w łańcuchu przyczynowo-skutkowym: T, I, P, W, E i O, S i N, A.

Największą wartość wskaźnika pozycji osiąga czynnik decyzji projektanta, co wskazuje na jego kluczową rolę w identyfikacji charakteru rozpatrywanych czynników. Najmniej eksponowaną rolę wykazuje przy tym czynnik awarii (A). Rola pozostałych czynników jest raczej przeciętna.

5. Podsumowanie

Obiektywna analiza przebiegu i przyczyn awarii budowlanych jest złożonym zagadnieniem. Złożoność ta wynika z charakteru obiektów budowlanych, a także procesów przygotowywania ich wznoszenia oraz samej ich realizacji. Ważną rolę pełnią przy tym okoliczności, wiążące ze sobą różne podmioty, zaangażowane w budowlany proces inwestycyjny.

Trudności analizy można zasadniczo ograniczyć, posługując się odpowiednimi narzędziami wspomagania decyzji. W pracy rozważono możliwość zastosowania w tym celu jednej z niedocenianych jeszcze metod wspomagania decyzji, jaką jest DEMATEL.

Wyniki otrzymane dla rozważanego zagadnienia awarii przekrycia zbiornika potwierdzają użyteczność tego narzędzia. Zasadniczymi atutami, przemawiającym za jego wykorzystaniem w praktyce budowlanej są: łatwość zasad i implementacji obliczeniowej. Do jego wykorzystania wystarczy bowiem znajomość typowej aplikacji komputerowej arkusza kalkulacyjnego. Warto również zwrócić przy tym uwagę na elastyczność metody. Jak bowiem dowiodła praktyka, można ją łatwo łączyć z innymi metodami. Można przy tym także uwzględniać niepełny i niepewny charakter informacji, używając np. teorii zbiorów rozmytych.

Literatura

1. Pawlikowski J., Wojtkiewicz T.: Ekspertyza techniczna w związku z awarią przekrycia osadników wstępnych 11.01 i 11.11, WACETOB Sp. z o.o., Warszawa 2010.
2. Fontela E., Gabus A.: The DEMATEL Observer. DEMATEL 1976 Report. Technial Report. Batelle Geneva Research Center, Geneva 1976.
3. Dytczak M.: Równoległe zastosowanie metod AHP i DEMATEL w wielokryterialnej analizie decyzji. [W:] Knosala R. (red.): Komputerowo zintegrowane zarządzanie. T.I, PTZP, Opole 2008, s. 249÷257.
4. Dytczak M.: Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie. Politechnika Opolska, Opole 2010. ISBN 978-83-60691-94-6
5. Dytczak M., Ginda G.: Identification of building repair criteria role. Technological and Economic Development of Economy. Baltic Journal on Sustainability, vol. 15(2)/2009, s.213÷228.