

IDENTYFIKACJA PRIORYTETOWYCH POTRZEB UTRZYMANIA SYSTEMU TRANSPORTOWEGO PRZY UWZGLĘDNIENIU POWIĄZAŃ JEGO ELEMENTÓW

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwość zastosowania stosunkowo mało jeszcze znanych narzędzi wspomagania decyzji do identyfikacji potrzeb związanych z utrzymaniem złożonych systemów transportowych. Narzędzia te umożliwiają wiarygodne modelowanie zależności między częściami systemów, jednocześnie uwzględniając informacje o niedoskonałym charakterze w trakcie planowania działań utrzymaniowych dla jak najlepszego wykorzystania skąpych zasobów.

WSTĘP

Techniczne systemy transportu szynowego składają się z licznych, zróżnicowanych elementów. Właściwe utrzymanie elementów decyduje więc o gotowości systemu. Ograniczony charakter zasobów niezbędnych do utrzymania systemu transportu szynowego sprawia, że konieczny staje się ich racjonalny rozdział pomiędzy zadania służące utrzymaniu poszczególnych elementów systemu. Rozdział ten utrudnia zróżnicowanie charakteru składników systemu. We właściwym rozdziale może pomóc ustalenie hierarchii potrzeb związanych z utrzymaniem systemu.

Istnieją liczne narzędzia ułatwiające racjonalne określania potrzeb w utrzymaniu składników systemów technicznych. Pozwalają one określać potrzeby nawet w przypadku dostępności wyłącznie informacji o niedoskonałym charakterze. Na przykład Dytczak i Kwiesielewicz [1] zaproponowali wykorzystanie w tym celu wieloetapowego postępowania wykorzystującego niedoskonałą informację reprezentowaną przez pojęcia rozmyte.

Elementy systemu mogą być ze sobą powiązane na różne sposoby. Powiązania te decydują o efektywności elementów, a w konsekwencji i efektywności całego systemu. Dla właściwego przygotowania działań utrzymaniowych i wykorzystania ograniczonych zasobów należy więc zadbać o prawidłowe rozpoznanie struktury składników systemu i ich wzajemnych powiązań. Dopiero pozyskanie takiej informacji pozwala bowiem racjonalnie szacować potrzeby w odniesieniu zarówno do zakresu jak i niezbędnych zasobów.

W artykule przedstawiono zasady stosowania prostego, jeszcze stosunkowo mało w kraju znanego, a zarazem skutecznego narzędzia ułatwiających identyfikację hierarchii wzajemnie ze sobą powiązanych elementów systemu. Jest nim Interpretative Structural Modeling (ISM) Warfielda [2]. Dzięki dostarczeniu informacji o hierarchii elementów systemu ułatwia ono określanie najbardziej istotnych składników. Ponadto dzięki zastosowaniu analizy MICMAC (fr. Matrice d'Impacts croises-multiplication appliqué an classment) zaproponowanego przez Duperrina i Godeta [3] jest możliwe sklasyfikowanie składników. W konsekwencji otrzymujemy informację niezbędną dla realistycznego oszacowania potrzeb utrzymaniowych.

1. WYKORZYSTYWANE METODY

1.1. ISM

Metoda Warfielda [2] pozwala na identyfikacji hierarchii powiązanych ze sobą obiektów. Strukturę powiązań opisuje skierowany

graf reprezentowany przez macierz przejść $\hat{\mathbf{X}}$. W przypadku n obiektów składa się ona z n wierszy i n kolumn odpowiadających kolejnym obiektom. Jednostkowa wartość elementu w i -tym wierszu i j -tej kolumnie macierzy świadczy o istnieniu bezpośredniego powiązania obiektów: i -tego i j -tego ($ij = 1, 2, \dots, n$), a wartość zerowa – o braku takiego powiązania. Macierz $\hat{\mathbf{X}}$ umożliwia identyfikację pośredniego związku obiektów. Wykorzystujemy w tym celu początkową macierz osiągalności \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \mathbf{I} + \hat{\mathbf{X}}. \quad (1)$$

W powyższym wzorze \mathbf{I} stanowi macierz jednostkową o rozmiarze odpowiadającym macierzy $\hat{\mathbf{X}}$.

Macierz osiągalności ponosimy do kolejnych potęg $k = 2, 3, \dots$. Proces wyznaczania kolejnych potęg kończymy w momencie uzyskania ostatecznej postaci macierzy osiągalności spełniającej dla pewnej wartości wykładnika l następującą zależność:

$$\exists_l \hat{\mathbf{M}}^{(l)} = \hat{\mathbf{M}}^{(l-1)}. \quad (2)$$

w której $\hat{\mathbf{M}}^{(l)}$ oznacza binarne odwzorowanie wyniku podniesienia macierzy osiągalności do l -tej potęgi:

$$\forall_{i=1,2,\dots,n} \quad \forall_{j=1,2,\dots,n} \quad \hat{m}_{ij}^{(l)} = \begin{cases} 1 & \Leftrightarrow m_{ij}^{(l)} > 0 \\ 0 & \Leftrightarrow m_{ij}^{(l)} = 0 \end{cases}. \quad (3)$$

$m_{ij}^{(l)}$ oznacza przy tym element macierzy stanowiącej rezultat podniesienia \mathbf{M} do l -tej potęgi, zaś n jest liczbą rozważanych obiektów.

Kolejne wiersze ostatecznej postaci macierzy osiągalności $\hat{\mathbf{M}}^{(l)}$ zawierają informacje o następnikach poszczególnych obiektów, natomiast kolejne kolumny – informacje o poprzednikach poszczególnych obiektów w kontekście wpływu obiektów. Informacje te wykorzystujemy w wieloetapowej procedurze ustalania obiektów tworzących poszczególne poziomy hierarchii. Pierwszy etap dotyczy najniższego poziomu hierarchii, a kolejne pozwalają wyznaczyć obiekty tworzące wyższe poziomy. Jeżeli symbolami $\Gamma^+(i)$ oraz $\Gamma^-(i)$ oznaczymy odpowiednio zbiór następników oraz zbiór poprzedników i -tego obiektu to przynależność i -tego obiektu do danego poziomu hierarchii sygnalizuje równoważność zbioru następników oraz przecięcia zbioru następników i poprzedników:

$$\exists_{i=1,2,\dots,|\Gamma|} \Gamma^+(i) \equiv \Gamma^+(i) \cap \Gamma^-(i) \quad (4)$$

Przy tym Γ oznacza zbiór obiektów, którym nie przyporządkowano dotychczas poziomu hierarchii. W miarę rozbudowywania hierarchii obiektów podlega on stopniowej redukcji. Przyporządkowanie wszystkim obiektom poziomów hierarchii jest równoważne z zakończeniem procedury ($\Gamma = \emptyset$).

Obiekty, którym warto poświęcić najwięcej uwagi w trakcie utrzymania systemu tworzą najwyższy poziom hierarchii.

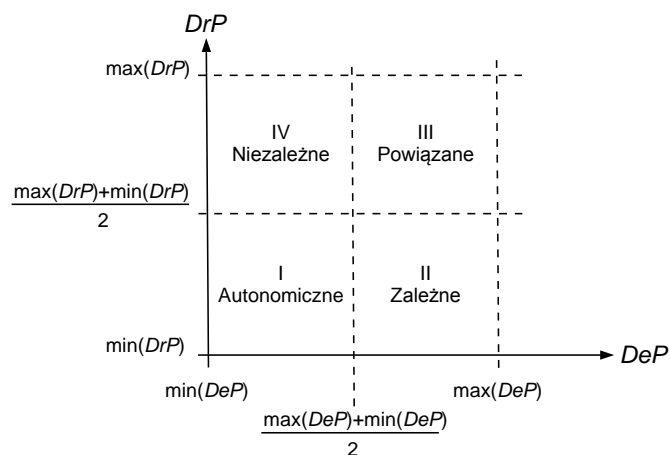
1.2. MICMAC

Rezultaty zastosowania ISM można pogłębić dzięki zastosowaniu dwóch wskaźników. Pozwalają one przeprowadzać dwuczynnikową klasyfikację obiektów. Wskaźnikami tymi są: siła wpływu DrP (ang. Driving Power) oraz siła zależności DeP (ang. Dependence Power). Wyznaczamy je na podstawie wierszowych i kolumnowych sum elementów ostatecznej postaci macierzy osiągalności:

$$\forall_{i=1,2..n} DrP_i = \sum_{j=1}^n \hat{m}_{ij}^{(l)}, \quad (5)$$

$$\forall_{i=1,2..n} DeP_i = \sum_{j=1}^n \hat{m}_{ji}^{(l)}.$$

Na podstawie wartości obu wskaźników budujemy dwuwymiarowy wykres (Rys.1). Dzielimy go na 4 ćwiartki odpowiadające czterem klasom obiektów. Pierwszą tworzą obiekty autonomiczne wywierające niewielki wpływ na pozostałe obiekty. Obiekty zależne występują w klasie drugiej. W trzeciej klasie mamy obiekty silnie powiązane z pozostałymi obiektami, a czwartą tworzą obiekty niezależne od pozostałych. Z uwagi na silne powiązania z innymi obiektami i silny wpływ na inne obiekty najbardziej interesujące są obiekty klasy trzeciej. Dlatego to im właśnie należy poświęcić najwięcej uwagi w trakcie planowania utrzymania systemu. Warto także zwrócić uwagę na obiekty, którym odpowiadają wartości wskaźników bliskie granicy klasy III.



Rys. 1. Klasyfikacja obiektów MICMAC [4]

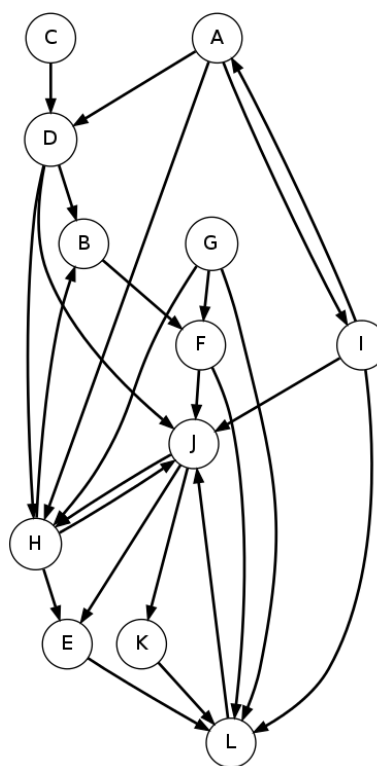
2. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA

2.1. Dane

Dla zilustrowania zasad korzystania z przedstawionych powyżej narzędzi rozpatrzmy zagadnienie identyfikacji kluczowych obiektów systemu transportowego w kontekście potrzeb związanych z jego utrzymaniem. Wyboru dokonujemy spośród 12 obiektów technicznych oznaczonych kolejnymi literami alfabetu łacińskiego. Ich bezpośrednie powiązania opisuje graf przedstawiony na rysunku 2. Formuła (6) wyraża odpowiadającą mu macierz przejść. Kolejne wiersze i kolumny macierzy odpowiadają kolejnym obiektom wy-

mienionym w kolejności alfabetycznej. Początkową postać macierzy osiągalności \mathbf{M} prezentuje formuła (7).

$$\hat{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$



Rys. 2. Ilustracja bezpośrednich powiązań obiektów

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

2.2. Identyfikacja hierarchii obiektów

Okazuje się, że warunek (2) zostaje spełniony przy wartości wykładnika $l = 6$. Ostateczna postać macierzy osiągalności wygląda więc następująco:

$$\hat{M}^{(6)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Z ostatecznej postaci macierzy przejść (8) wynikają zbiory poprzedników i następników przedstawione w tab.1. Na ich podstawie stwierdzamy, że zależność (4) jest spełniona w przypadku siedmiu obiektów: B, E, F, H, J, K i L. Tworzą więc one najniższy poziom hierarchii. Zbiór obiektów rozpatrywanych w kolejnym etapie ustalania hierarchii ulega więc ograniczeniu do 5 pozostałych (tab.2).

Tab. 1. Pierwszy etap obliczeń

Obiekt	i	$\Gamma^+(i)$	$\Gamma^-(i)$	$\Gamma^+(i) \cap \Gamma^-(i)$
A	1	{A,B,D,E,F,H,I,J,K,L}	{A,I}	{A,I}
B	2	{B,E,F,H,J,K,L}	{A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L}	{B,E,F,H,J,K,L}
C	3	{B,C,D,E,F,H,J,K,L}	{C}	{C}
D	4	{B,D,E,F,H,J,K,L}	{A,C,D,I}	{D}
E	5	{B,E,F,H,J,K,L}	{A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L}	{B,E,F,H,J,K,L}
F	6	{B,E,F,H,J,K,L}	{A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L}	{B,E,F,H,J,K,L}
G	7	{B,E,F,G,H,J,K,L}	{G}	{G}
H	8	{B,E,F,H,J,K,L}	{A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L}	{B,E,F,H,J,K,L}
I	9	{A,B,D,E,F,H,I,J,K,L}	{A,I}	{A,I}
J	10	{B,E,F,H,J,K,L}	{A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L}	{B,E,F,H,J,K,L}
K	11	{B,E,F,H,J,K,L}	{A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L}	{B,E,F,H,J,K,L}
L	12	{B,E,F,H,J,K,L}	{A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L}	{B,E,F,H,J,K,L}

Tym razem warunek (4) jest spełniony przez 3 obiekty: D, G oraz I. Tworzą więc one przedostatni poziom hierarchii, a zbiór obiektów rozważanych w kolejnym kroku topnieje do 2.

W rezultacie kolejnego kroku obliczeń (tab.3) okazuje się, że wszystkie rozpatrywane w nim obiekty spełniają warunek (7). Tworzą więc one najwyższy poziom hierarchii (Rys.3).

Tab. 2. Drugi etap obliczeń

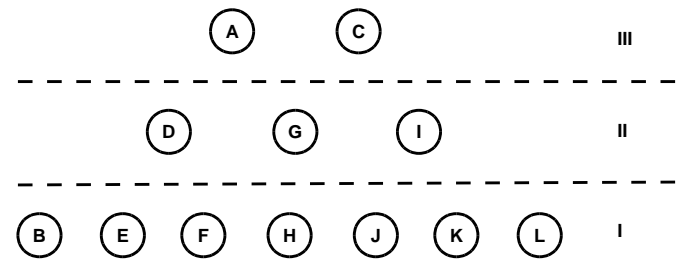
Obiekt	l	$\Gamma^+(i)$	$\Gamma^-(i)$	$\Gamma^+(i) \cap \Gamma^-(i)$
A	1	{A,D,I}	{A,I}	{A,I}
C	3	{C,D}	{C}	{C}
D	4	{D}	{A,C,D,I}	{D}
G	7	{G}	{G}	{G}
I	9	{A,I}	{A,I}	{A,I}

2.3. Analiza MICMAC

Na podstawie zawartości ostatecznej postaci macierzy osiągalności (8) otrzymujemy dla poszczególnych obiektów wartości wskaźników DrP i DeP przedstawione w tab.4.

Tab. 3. Trzeci etap obliczeń

Obiekt	l	$\Gamma^+(i)$	$\Gamma^-(i)$	$\Gamma^+(i) \cap \Gamma^-(i)$
A	1	{A}	{A}	{A}
C	3	{C}	{C}	{C}



Rys. 3. Ostateczna postać hierarchii obiektów

Wyniki klasyfikacji świadczą o tym, że w przypadku żadnego z obiektów nie odnotowano jednocześnie ponad przeciętnych wartości obu wskaźników. Żadnego spośród nich nie da się więc sklasyfikować jako powiązanego z innymi, a jednocześnie znacząco wpływającego na inne obiekty. Dlatego wyniki analizy MICMAC nie poszerzają ustalonych wcześniej obiektów priorytetowych z uwagi na utrzymanie systemu.

Tab. 4. Klasyfikacja MICMAC obiektów

Obiekt	l	$DeP [-]$	$DrP [-]$	Charakter
A	1	2	10	niezależny
B	2	12	7	zależny
C	3	1	9	niezależny
D	4	4	8	autonomiczny
E	5	12	7	zależny
F	6	12	7	zależny
G	7	1	8	autonomiczny
H	8	12	7	zależny
I	9	2	10	niezależny
J	10	12	7	zależny
K	11	12	7	zależny
L	12	12	7	zależny
	min	1	7	
	max	12	10	
	śr.	6,5	8,5	

PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule narzędzia wspomaganie decyzji, ISM i MICMAC, są jeszcze stosunkowo słabo znane, a zarazem rzadko wykorzystywane w praktyce wspomaganie decyzji dotyczącego utrzymania systemów technicznych. Ich podstawowe zalety stanowią: czytelny charakter, prostota zastosowanego aparatu matematycznego oraz elastyczność aplikacyjna, ułatwienie wykorzystywania informacji o niedoskonałym charakterze i współzależności między składnikami systemu. Szczególnie 3 ostatnie z wymienionych zalet sprawiają, że te wzajemnie uzupełniające się metody stanowią interesujące instrumentarium wspomaganie decyzji związanych z planowaniem utrzymania złożonych systemów technicznych. Można je więc z powodzeniem wykorzystywać również w trakcie przygotowywania działań utrzymaniowych związanych z systemami transportowymi zapewniających właściwe wykorzystanie ograniczonych zasobów.

BIBLIOGRAFIA

1. Dytczak M., Kwisielewicz M., *Wieloatrybutowy model decyzyjny w polityce remontowej technicznych systemów infrastruktury komunalnej*. W: Knosala R. (red.) Komputerowo zintegrowane zarządzanie, t.I, PTZP, Opole 2008, s.277-284.

2. Warfield J.N., *Towards interpretation of Complex Structural Models*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 1974, SMC-4(5):405-417.
3. Duperrin J.C., Godet M., *Methode de hierarchisation des elements d'un systeme*, Rapport Economique du CEA, R-45-21, Paris.
4. Ginda G., *Metody porównywania parami w budownictwie i dziedzinach pokrewnych*, DWE, Wrocław 2015.

IDENTIFICATION OF PRIORITY MAINTENANCE NEEDS WHILE INCLUDING INTERDEPENDENCIES BETWEEN TRANSPORTATION SYSTEM COMPONENTS

Abstract

Possibility of application of relatively less known decision support tools for the identification of maintenance needs in the a case of complex transportation system is discussed in the paper. The tools allow to model the interdependencies between system components while including available imperfect information during planning maintenance activities to utilize the available scarce resources in the best possible way.

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. **Mirosław Dytczak** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Zarządzania w Energetyce, Pracownia Zastosowań Metod Wielokryterialnych, e-mail: mdytczak@gmail.com

dr inż. **Grzegorz Ginda** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Zarządzania w Energetyce, Pracownia Zastosowań Metod Wielokryterialnych, e-mail: gg.ginda@gmail.com