

KASZUBOWSKI Daniel<sup>1</sup>  
OSKARBSKI Jacek<sup>2</sup>

## Symulacja procesu wyboru metody wykrywania zdarzeń drogowych

*inteligentne systemy transportu, bezpieczeństwo ruchu,  
wykrywanie zdarzeń drogowych,  
analiza wielokryterialna*

### Streszczenie

Wdrażane w ostatnich latach w coraz większym zakresie środki Inteligentnych Systemów Transportu pozwalają na zwiększenie niezawodności systemu transportu w miastach i drogach zamiejskich. Jednym z aspektów stosowania urządzeń telematyki transportu jest możliwość szybszego wykrywania zdarzeń drogowych i reagowania na ich wystąpienie. Stosowanie metod wykrywania zdarzeń drogowych pozwala na zmniejszenie zakłóceń ruchu, związanych z występowaniem incydentów oraz poprawę bezpieczeństwa ruchu poprzez zmniejszenie ciężkości wypadków w wyniku szybszej pomocy ich ofiarom. W referacie przedstawiono teoretyczną symulację procesu wyboru metody wykrywania zdarzeń drogowych z wykorzystaniem metody analitycznego procesu hierarchicznego AHP. Jest to metoda wielokryterialnego podejmowania decyzji wykorzystująca możliwość przedstawienia problemu decyzyjnego w postaci hierarchicznej struktury oddziałujących na siebie elementów. Oferuje ona dużą elastyczność w kształtowaniu struktury decyzyjnej oraz uwzględnienie i porównania wielu rodzajów kryteriów za pomocą ujednoczonej skali.

### SIMULATION OF THE PROCESS OF SELECTING THE METHOD FOR DETECTION OF TRAFFIC INCIDENTS

### Abstract

An increasing range of Intelligent Transport Systems tools implementation in recent years allows to increase the reliability of urban transport system as well as rural. One aspect of the use of transport telematics devices is the ability to detect quickly traffic incidents and responding to their occurrence. The use of methods for the detection of traffic incidents helps to reduce traffic disruption associated with the occurrence of incidents and improve traffic safety by reducing the severity of accidents as a result of faster assistance to the victims. The paper presents a theoretical simulation of the process of choosing the method for detection of traffic incidents using the Analytic Hierarchy Process AHP. This method is multicriteria decision making, using the opportunity of a decision problem presentation in a hierarchical structure of interacting elements. It offers great flexibility in shaping the decision-making structure and the inclusion and comparison of many types of criteria with a unified scale.

### 1. WSTĘP

Incydenty występujące w ruchu drogowym są główną przyczyną występowania zatłoczenia na autostradach i drogach ekspresowych. Szacuje się, że 50-60% strat czasu na drogach ekspresowych i autostradach, przebiegających w obszarach zurbanizowanych, jest wynikiem występowania incydentów [1], [2]. Zatłoczenie spowodowane przez incydenty jest przyczyną dodatkowych kosztów w ruchu drogowym, będących skutkiem wzrostu strat czasu, zużycia paliwa oraz wypadków wtórnych, będących wynikiem najechania na pojazdy stojące lub przemieszczające się w kolejkach. Istnieje wiele czynników, które mogą powodować zakłócenia potoku ruchu a konsekwencje i rozmiar tych zaburzeń mogą być różne. Zatłoczenie pojawia się w przypadku popytu transportowego, który przekracza podaż poszczególnych elementów sieci transportowej określoną dla krytycznego poziomu swobody ruchu (przepustowość). Występowanie incydentów ogranicza podaż sieci, przyczyniając się do intensyfikacji zatłoczenia. Można wyróżnić dwa rodzaje zatłoczenia [3]:

- zatłoczenie powtarzające się w danym miejscu i o danej porze dnia, które występuje w przypadku wyczerpywania przepustowości na skutek zwiększonego potoku ruchu (np. podczas szczytów transportowych). Takie zatłoczenie można przewidzieć poprzez obserwację lub za pośrednictwem modelu ruchu.

- zatłoczenie jednokrotne jest wynikiem nieoczekiwanego ograniczenia przepustowości, na przykład spowodowanego wystąpieniem zdarzenia drogowego. Ze względu na to, że ten rodzaj zatłoczenia jest nieprzewidywalny i niespodziewany dla kierowców, przyczynia się do zwiększenia ryzyka wystąpienia wypadków wtórnych oraz nietypowych i niebezpiecznych zachowań uczestników ruchu. Przyczyną takiego zatłoczenia są incydenty (choć nie zawsze incydenty przyczyniają się do powstawania zatłoczenia). W celu uniknięcia lub zredukowania zatłoczeń powtarzających się stosuje się środki ITS, które pozwalają na wykorzystanie rezerw przepustowości w układzie drogowym (np. systemy sterowania ruchem w sieci dróg wyposażonej w sygnalizację świetlną lub systemy zarządzania ruchem na węzłach

<sup>1</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej; 80-233 Gdańsk; ul. Narutowicza 11/12. Tel. +48 692-478-220, E-mail: dankasz@pg.gda.pl

<sup>2</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej; 80-233 Gdańsk; ul. Narutowicza 11/12. Tel. +48 604-475-876, E-mail: joskar@pg.gda.pl

autostradowych tzw. „ramp metering”). W celu redukcji lub likwidacji zatłoczeń jednokrotnych oraz ograniczenia ich niekorzystnego wpływu na funkcjonowanie transportu konieczne jest wdrażanie dobrze funkcjonujących systemów detekcji i monitoringu, systemów informacji np. z wykorzystaniem tablic zmiennej treści oraz sprawnego systemu ratownictwa i pomocy drogowej, umożliwiających szybką likwidację skutków incydentów, w tym zdarzeń drogowych. Dzięki stosowaniu systemów wykrywania incydentów, zarządcy dróg uzyskują możliwość ostrzeżenia kierowców o niebezpieczeństwie oraz kierowania ruchu na trasy alternatywne. Szybka likwidacja zatłoczenia i przywrócenie normalnych warunków ruchu wymaga jak najszybszego wykrycia lokalizacji incydentu i jego rodzaju, co w przypadku wykrycia wypadku drogowego skutkuje sprawnym dojazdem i przeprowadzeniem akcji ratowniczej, co z kolei przyczynia się do wstrzymania ekspansji zatłoczenia oraz zmniejszenia ciężkości wypadków, poprzez szybsze udzielenie pomocy ofiarom. Wykrycie i weryfikacja wypadku drogowego powinno zatem nastąpić w pierwszej kolejności. Metody wykrywania zdarzeń decydują o szybkości ich wykrycia, dlatego też należy dążyć do stosowania metod najbardziej efektywnych.

Porównanie metod wykrywania zdarzeń drogowych w celu wyboru rozwiązania optymalnego w założonej sytuacji, wymaga uwzględnienia zróżnicowanych kryteriów oceny. Kryteria takie mają charakter zarówno ilościowy jak i jakościowy. Są one związane bezpośrednio ze specyfiką techniczną poszczególnych systemów, jak również wynikające z porównania poziomów ich zaawansowania, ilości wdrożeń oraz relatywnej oceny możliwości praktycznego zastosowania. W referacie przedstawiono symulację procesu wyboru najlepszej metody wykrywania zdarzeń z wykorzystaniem metody analitycznego procesu hierarchicznego AHP.

## 2. METODY I ALGORYTMY WYKRYWANIA ZDARZEŃ DROGOWYCH

Można zidentyfikować kilka celów wdrażania systemów zarządzania incydentami, których elementem są systemy ich wykrywania. Pierwszym z nich jest możliwość bardziej efektywnego wykorzystania przepustowości istniejącego układu drogowego w przypadku wystąpienia incydentu poprzez wpływanie na rozkład ruchu (ograniczanie przeciążeń elementów układu drogowego i odciążanie ciągów, na których nastąpiły zaburzenia w ruchu spowodowane incydem przy jednoczesnym dociążaniu ciągów alternatywnych, dzięki czemu następuje zwiększenie efektywności systemu transportu poprzez poprawę płynności ruchu i zmniejszenie globalnych strat czasu). Kolejnym celem wdrażania systemów zarządzania incydentami jest poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego (zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia drogowego lub wtórnego zdarzenia drogowego w przypadku wystąpienia kolejki) poprzez zastosowanie detekcji incydentów, systemu informowania kierowców o konieczności zredukowania prędkości jazdy w przypadku nietypowych sytuacji na drodze (remonty, gołoledź, zdarzenie drogowe itp.). Celem wdrożenia systemu zarządzania transportem podczas występowania incydentów jest również usprawnienie działań operacyjnych służb drogowych, służb ratowniczych i policji. Istotna jest również możliwość gromadzenia informacji, danych z systemu detekcji, które stanowią podstawę do analiz pozwalających na szacowanie sprawności systemu transportowego, usprawniania procedur i planowania oraz wdrażania nowych strategii. Systemy wykrywania zdarzeń drogowych stanowią element systemów zarządzania incydentami. Od odpowiednio wczesnej identyfikacji zdarzenia zależy efektywność dalszych działań systemu zarządzania incydentami, zmierzających do przywrócenia normalnych warunków ruchu oraz szybkość przeprowadzenia akcji ratowniczej. Pośród metod wykrywania zdarzeń drogowych można wymienić wykorzystanie informacji przekazanej służbom zarządzania ruchem przez świadków zdarzenia za pośrednictwem telefonu komórkowego (technologia telefonów komórkowych), informację z kamer telewizji przemysłowej (mało efektywna w przypadku braku możliwości automatycznej identyfikacji zdarzenia), wykrywanie zdarzenia za pośrednictwem systemów detekcji (najczęściej z wykorzystaniem detektorów pętlowych – pętli indukcyjnych lub za pośrednictwem technik przetwarzania obrazu wideo), wykrywania zdarzeń z wykorzystaniem systemów monitoringu w pojazdach (np. eCall) lub wykrywania zdarzenia drogowego przez specjalistyczne patrole, które nadzorują poszczególne odcinki drogi i w przypadku wykrycia poważnego zdarzenia informują odpowiednie służby. Możliwa jest również kombinacja kilku metod, co gwarantuje większą niezawodność systemu. Poniżej opisano pokrótce algorytmy wykorzystujące technologie informatyczne i urządzenia telematyki transportu, związane na trwałe z infrastrukturą drogową.

W okresie ostatnich 30 lat rozwinięto cztery główne grupy algorytmów wykrywania zdarzeń: algorytmy bazujące na modelach wzorcowych, algorytmy bazujące na teorii katastrofy, algorytmy bazujące na obliczeniach statystycznych oraz algorytmy bazujące na sztucznej inteligencji. Jako osobną grupę przedstawia się algorytmy przetwarzania obrazu wideo, w której często wykorzystuje się algorytmy z wyżej wymienionych grup [4]. Algorytmy bazujące na modelach wzorcowych korzystają one z informacji o parametrach potoku ruchu, otrzymywanych z pętli indukcyjnych, tj. natężenia ruchu i zajętości detektora, porównując dane z detektorów z wzorami teoretycznymi, wyprowadzonymi z danych historycznych. Spośród algorytmów tej grupy należy wymienić algorytm kalifornijski (zwany również algorytmem TSC), wraz z jego późniejszymi modyfikacjami (algorytmy TSC#7 i TSC#8), algorytm APID, algorytm PATREG oraz algorytm Minnesota[4], [5]. Algorytmy bazujące na teorii katastrofy uwzględniają wystąpienie naglej, dyskretnej zmiany w jednej zmiennej, podczas gdy pozostałe zmienne zależne wykazują zmiany ciągłe w czasie (rozważane zmienne to prędkość pojazdów, zajętość detektora oraz natężenie ruchu). Niewątpliwą zaletą algorytmów z tej grupy jest możliwość odróżnienia zaistnienia zdarzenia od zmian zmiennych, związanych z wystąpieniem zatłoczenia drogi, wynikającego z wyczerpywania przepustowości. Różnica pomiędzy algorytmami opartymi na teorii katastrofy a algorytmami bazującymi na wzorcach polega na tym, że metoda wzorcowa bazuje na określaniu zmian pojedynczych zmiennych w uprzednio określonych progach, natomiast w teorii katastrofy porównuje się wiele zmiennych w czasie, porównując je z wcześniejszymi trendami zmienności danych. Grupę algorytmów bazujących na teorii katastrofy reprezentuje algorytm McMaster [6], [7]. W algorytmach bazujących na obliczeniach statystycznych następuje porównanie bieżących danych



o potoku ruchu, pozyskanych z detekcji z danymi uzyskanymi z prognoz. W prognozach zastosowanie znajdują szeregi czasowe. Algorytmy klasyfikują jako zdarzenia wszystkie zmiany parametrów ruchu wykraczające poza prognozowany zakres wartości parametrów. Spośród algorytmów bazujących na obliczeniach statystycznych można wyróżnić: algorytm HIOCC (High Occupancy Algorithm), algorytm ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving-Average), algorytm SND (Standard Normal Deviates), algorytm DES (Double Exponential Smoothing), algorytm DELOS (Detection Logic with Smoothing), algorytm Bayesian oraz algorytm pojedynczego detektora SSID (Single-Station Incident Detection) i Low Pass Filter [4], [5]. Sztuczna inteligencja wykorzystywana jest w najmłodszej grupie algorytmów automatycznego wykrywania zdarzeń. Zastosowanie znajdują tutaj sieci neuronowe oraz teoria zbiorów rozmytych. Algorytmy z tej grupy charakteryzują się znacznym udziałem fałszywych alarmów oraz stosunkowo długim czasem wykrywania zdarzeń.

W tabeli 1 przedstawiono porównanie wybranych parametrów skuteczności poszczególnych algorytmów: wskaźnika wykrywalności (detection rate – DR), wskaźnika fałszywych alarmów (false alarm rate – FAR) oraz czasu wykrycia zdarzenia (time to detect – TTD). Przedstawione wartości parametrówbrane były pod uwagę w analizie AHP.

Tab. 1. Zestawienie wyników analizy wybranych parametrów skuteczności algorytmów

Nazwa algorytmu	DR (%)	TTD (min)	FAR (%)	Miejsce badania
APID	86	2.50	0.05	Toronto, Boston
DES	92	0.70	1.87	Toronto
ARIMA	100	0.40	1.50	Laboratorium
Bayesian	100	3.90	0	Laboratorium
California	82	0.85	1.73	California, Chicago, Texas
McMaster	68	2.20	0.0018	Minnesota
Sieci neuronowe	89	0.9 - 0.96	0.01 - 0.012	Laboratorium
Zbiory rozmyte	n/a	n/a	do 1.00	n/a
SND	92	1.10	1.30	n/a
SSID	100	n/a	0.20	Laboratorium
Low Pass Filter	80	4.00	0.3	Laboratorium
TSC #7	67	2.91	0.134	California, Chicago, Texas
TSC #8	68	3.04	0.177	California, Chicago, Texas
Przetwarzanie wideoobrazu	90	0.37	3.00	Francja

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4], [5], [8].

### 3. PROCES WYBORU METODY WYKRYWANIA ZDARZEŃ Z WYKORZYSTANIEM AHP

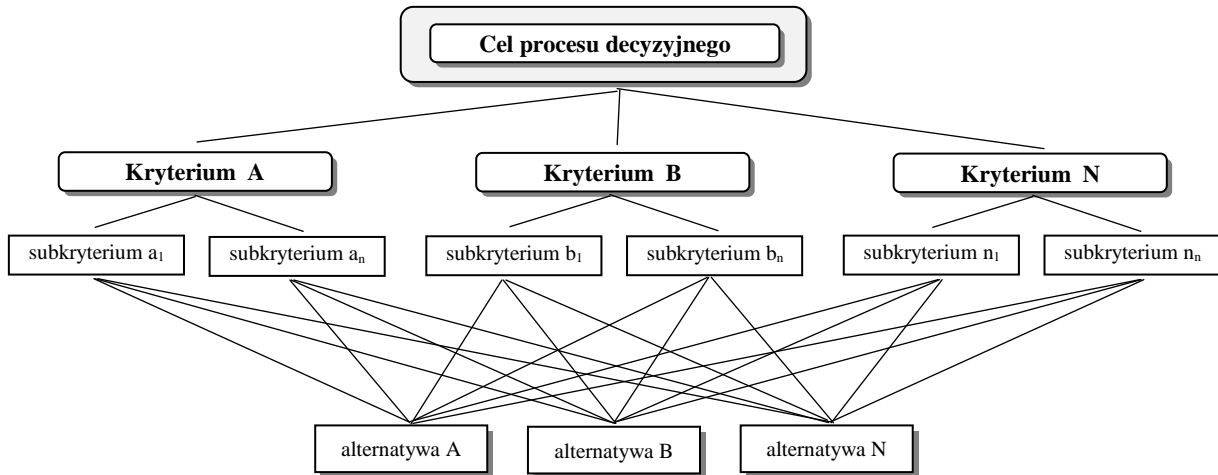
#### 3.1 Założenia metody AHP

Analityczny proces hierarchiczny to metoda wielokryterialnego wspierania decyzji. Za jej pomocą można dokonać wyboru jednego z spośród szeregu zidentyfikowanych wariantów decyzyjnych w oparciu o odpowiednio dobrany zbiór kryteriów. Z uwagi na dużą elastyczność konstruowania struktury decyzyjnej metoda AHP jest właściwa do rozwiązywania specyficznych problemów, wymagających uwzględnienia wielu kryteriów, poziomów analizy i czynników ograniczających. AHP umożliwia kompleksowe podejście do problemów decyzyjnych poprzez ich odpowiednie strukturyzowanie i hierarchizację. Przyczynia się do lepszego zrozumienia istoty analizowanego problemu oraz uwzględnienie i racjonalną ocenę jego poszczególnych elementów.

Proces decyzyjny z wykorzystaniem metody AHP rozpoczyna się od przedstawienia problemu w postaci drzewa hierarchii, gdzie poszczególne poziomy i elementy odpowiadają wybranym obszarom badanego zjawiska. Mogą one mieć charakter ilościowy i jakościowy, zgodnie z wymaganiami decydenta oraz dostępnością danych. Uproszczonej strukturę modelu AHP przedstawia rysunek 1. Po skonstruowaniu hierarchii następuje proces oceny poszczególnych elementów poprzez porównywanie ich parami. Do porównań można wykorzystywać konkretne dane liczbowe, lub opierać się na fundamentalnej skali porównań opracowanej przez autora metody, prof. Thomasa L. Saaty'ego. Skalę tę przedstawia tabela 2. Oceny wykonane w drodze kolejnych porównań parami są następnie przetwarzane na priorytety liczbowe przypisane każdemu elementowi i alternatywie. Tak uzyskane wagi (priorytety) pozwalają na porównanie zróżnicowanych kryteriów w przejrzysty i spójny wewnętrznie sposób. Końcowym etapem procesu decyzyjnego jest przedstawienie wag dla poszczególnych alternatyw decyzyjnych. Przedstawiają one relatywną zdolność wariantów do osiągnięcia celu i pozwalają na ich bezpośrednie porównanie. W przypadku nierozbudowanych hierarchii możliwe jest wykonywanie poszczególnych obliczeń za pomocą arkusza kalkulacyjnego, jednak znacznie lepsze efekty można osiągnąć stosując wyspecjalizowane programy opracowane specjalnie na potrzeby tej metody. W prezentowanym referacie wykorzystano do tego program *Superdecisions*. Za jego pomocą można tworzyć dowolnie rozbudowane modele decyzyjne oraz znacznie usprawnić całą procedurę.

Sytuacje decyzyjne w których można stosować analityczny proces sieciowy to:

- wybór: wskazanie jednej alternatywy z przyjętego zbioru z uwagi na przyjęte kryteria decyzyjne; odpowiada to pierwotnym założeniom metody AHP, które kładły nacisk na ułatwienie wyboru nie tyle bezwzględnie najlepszego rozwiązania, ale rozwiązania najlepszego w danej sytuacji i dla danego decydenta,
- ranking: uszeregowanie alternatyw w kolejności od najbardziej do najmniej atrakcyjnej,
- alokacja zasobów: podział dostępnych zasobów pomiędzy alternatywne sposoby ich wykorzystania,
- benchmarking: porównanie wybranego procesu w analizowanym przedsiębiorstwie z identycznym procesem realizowanym u lidera w danej dziedzinie,
- zarządzanie jakością: analiza optymalnych rozwiązań w zakresie definiowania jakości oraz tworzenia systemów jakości.



Rys. 1 Struktura modelu decyzyjnego w metodzie AHP

Tab . 2 Fundamentalna skala porównań stosowana w metodzie AHP

Skala ważności	Definicja	Opis
1	równe znaczenie	dwa elementy w równym stopniu przyczyniają się do realizacji celu
3	nieznaczna przewaga	doświadczenie, obserwacje lub ocena wskazują że jeden element ma nieco większe znaczenie niż drugi
5	mocna przewaga	jeden z elementów ma znacznie większe znaczenie niż drugi
7	bardzo mocna (silna) przewaga	dominacja jednego elementu nad drugim, udowodniona w praktyce
9	przewaga absolutna	przewaga jednego elementu nad drugim jest na najwyższym możliwym do określenia poziomie
2,4,6,8	poziomy pośrednie	
odwrotność powyższych ocen	przechodniość skali	jeżeli porównaniu elementu A z B przyporządkowana zostanie wartość x, to wtedy automatycznie wynikiem porównania B z A będzie 1/x

Źródło: opracowanie własne na podstawie [9].

### 3.2 Procedura metody AHP

Zastosowanie analitycznego procesu hierarchicznego sprowadza się do matematycznej syntezy wielu opinii o problemie decyzyjnym wyrażonych w postaci ujednocionej skali porównań. Do osiągnięcia rozwiązania problemu należy zastosować odpowiednią procedurę, której dwa najważniejsze elementy zostały przedstawione w dalszej części referatu.

#### Przedstawienie problemu decyzyjnego w postaci hierarchii

Hierarchia jest przedstawieniem złożonego problemu decyzyjnego w postaci wielostopniowej struktury, w której na szczycie znajduje się cel, po którym następują kolejne poziomy dotyczące czynników, kryteriów, subkryteriów i zamykających hierarchię alternatyw. Hierarchia może służyć jako praktyczny sposób dekompozycji problemu

w poszukiwaniu związków przyczynowo – skutkowych pomiędzy poszczególnymi elementami tworzącymi łańcuch powiązań [9]. Celem stworzenia hierarchii jest ocena wpływu elementów położonych na poziomach wyższych na elementy na poziomach bezpośrednio pod nimi. Wykorzystanie hierarchii umożliwia przypisanie każdemu elementowi odpowiedniej wagi uwzględniającej jego ważność, która będzie przenoszona poprzez poszczególne poziomy hierarchii aż do poziomu alternatyw decyzyjnych. Podstawową przyczyną grupowania różnych elementów w hierarchie jest zazwyczaj trudność w uchwyceniu wewnętrznej dynamiki i złożoności analizowanego problemu w taki sposób, aby jednoznacznie określić ważność różnych zjawisk. Podczas tworzenia hierarchii należy dążyć do uwzględnienia w niej wystarczającej liczby kryteriów tak, aby opisać problem możliwe najdokładniej. Jest to podstawowy problem w początkowym etapie tworzenia modelu, bowiem powstaje zagrożenie włączania do niego zbyt wielu elementów o małym wpływie na końcową decyzję. Właściwie uporządkowanie racjonalnie dobranych elementów w hierarchii służy trzem celom:

- zapewnia całościowy obraz złożonych powiązań w ramach badanego zjawiska,
- umożliwia przedstawienie wpływu elementów o większym znaczeniu na elementy mniej istotne lub bardzo szczegółowe,
- pomaga decydentowi w ocenie, czy porównuje on czynniki o tym samym znaczeniu lub wpływie na ostateczną decyzję.

Kryteria na poszczególnych poziomach hierarchii powinny być grupowane w klastry podobnych elementów. Takie grupy powinny obejmować od 5 do 9 elementów tak, aby można było je racjonalnie porównać w stosunku do elementów na wyższym poziomie. Zasadą tworzenia klastrów jest dążenie do ich wewnętrznej spójności. Wyraża się to grupowaniem elementów o podobnym znaczeniu. Jeżeli różnice pomiędzy elementami są zbyt wyraźne, należy rozważyć przeniesienie ich na inny poziom. Jedynym ograniczeniem w tworzeniu hierarchii elementów jest to, że dany element musi być logicznie powiązany z wybranymi elementami na poziomie wyższym w celu dokonanie oceny ich wpływu na poziom niższy. Alternatywy w modelu mogą być rozbieżne co do wpływu na cel procesu decyzyjnego oraz posiadać zróżnicowaną wagę w stosunku do kryteriów.

Właściwie zaprojektowana hierarchia jest jednocześnie stabilna oraz elastyczna. Stabilność przejawia się tym, że niewielkie zmiany w priorytetach poszczególnych elementów mają niewielki wpływ na wynik modelu. Elastyczność hierarchii wyraża się możliwością jej przemyślanej rozbudowy o dodatkowe elementy bez obawy o stabilność oceny. Można wyróżnić dwa podstawowe typy hierarchii:

1. hierarchie strukturalne – złożone systemy są ustrukturyzowane w podziale na części składowe z zachowaniem malejącego porządku ważności; odpowiada to podziałowi jakiegoś zjawiska lub przedmiotu na coraz mniejsze części składowe,
2. hierarchie funkcjonalne – organizują one części składowe badanych systemów zgodnie z ich najważniejszymi relacjami; umożliwia to śledzenie powiązań oraz uwzględnienie szeregu złożonych wzajemnych powiązań wewnątrz systemu; model przedstawiony w referacie jest hierarchią funkcjonalną z uwagi na wyodrębnienie kryteriów technicznych, funkcjonalnych oraz organizacyjnych, które reprezentują najważniejsze obszary zastosowania metod wykrywania zdarzeń drogowych.

### Obliczenie priorytetów elementów w hierarchii

Po opracowaniu struktury modelu decyzyjnego można przystąpić do nadawania wag (priorytetów) poszczególnym elementom na wszystkich poziomach modelu. Priorytet celu wynosi zawsze 1,00. Priorytety kolejnych poziomów w hierarchii będą zróżnicowane odzwierciedlając ich znaczenie w realizacji celu głównego, ale na każdym poziomie sumują się one do 1,00. Odnosi się to również do końcowych priorytetów alternatyw decyzyjnych. Waga nadana każdemu elementowi na niższym poziomie odzwierciedla jego udział w priorytecie elementu nadrzędnego. Poprzez porównania parami elementów na każdym poziomie względem elementu nadrzędnego uzyskiwane są tzw. kryteria lokalne. Mnożąc je przez wagi kolejnych elementów nadrzędnych uzyskuje się kryteria globalne, wskazujące na znaczenie dowolnego elementu w realizacji celu głównego [10].

### 3.2 Założenia modelu i kryteria wyboru

W celu symulacji procesu wyboru najkorzystniejszej metody wykrywania zdarzeń drogowych wstępnie zdefiniowano trzy grupy kryteriów wyboru. Pierwszą grupę stanowią kryteria techniczne, w których wyróżniono parametry skuteczności algorytmów, takie jak wskaźnik wykrywalności (DR), wskaźnik fałszywych alarmów (FAR), czas wykrycia zdarzenia (TTD) oraz możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury.

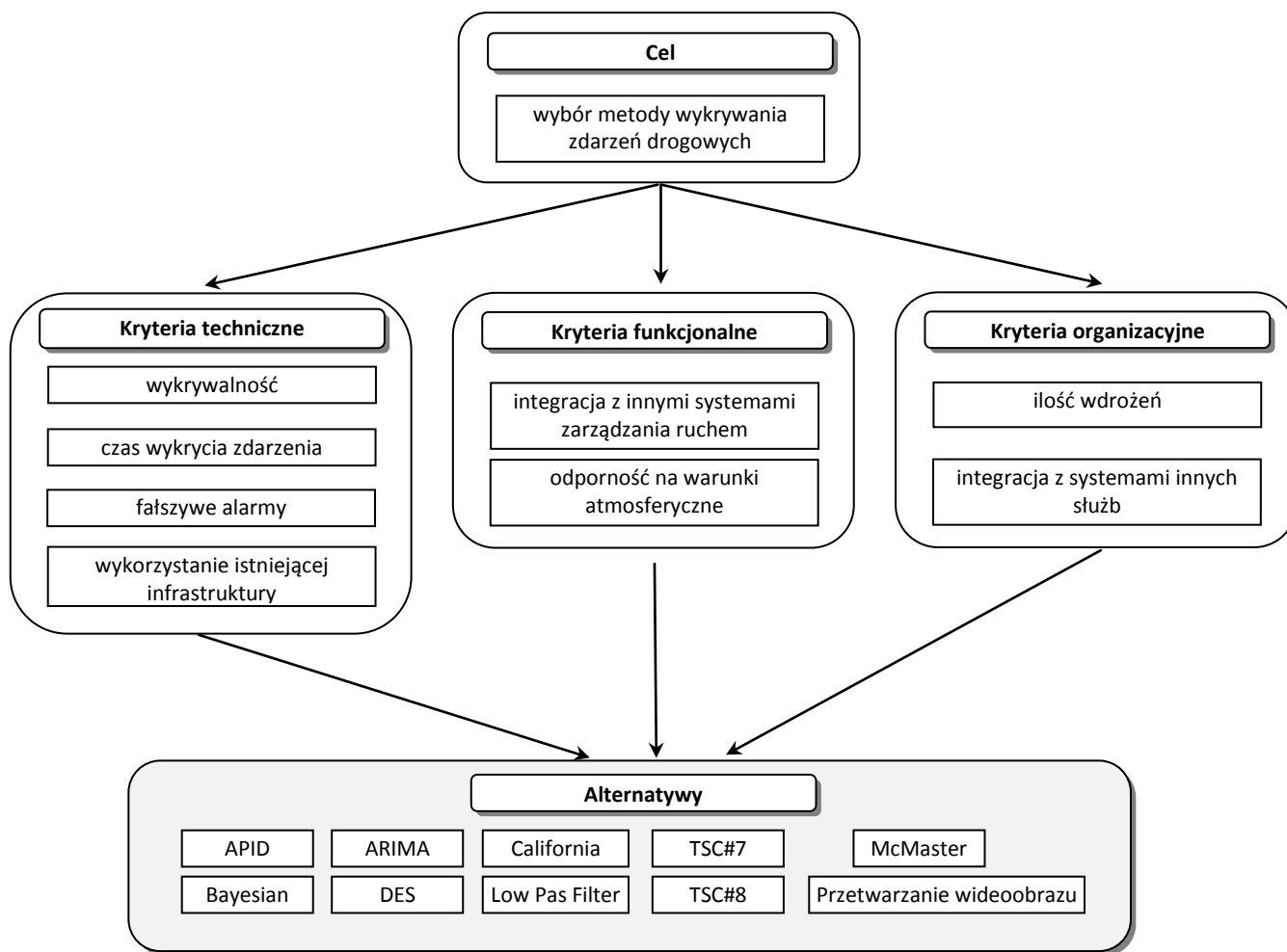
Wskaźnik wykrywalności oblicza się jako udział procentowy liczby wykrytych zdarzeń do całkowitej liczby zdarzeń. Należy nadmienić, że na wartość wskaźnika wykrywalności wpływa szereg czynników, których nie uwzględniono w niniejszej analizie. Czynniki te związane są z geometrią drogi oraz typem i czasem występowania incydentów (badano wpływ warunków atmosferycznych, ale stwierdzono, że w przypadku algorytmów wykorzystujących pętle indukcyjne, warunki pogodowe i stan nawierzchni nie wpływają na wartość DR) [11]. Spośród czynników związanych z geometrią drogi można wymienić przebieg osi drogi w planie sytuacyjnym (odcinek prosty lub łuk), przebieg niwelety (spadek, wzniesienie), obecność wjazdów, wjazdów i skrzyżowań. Wskaźnik wykrywalności zależny jest również od typu incydentu (zablokowanie pasa ruchu lub pojazd poza pasem ruchu) oraz pory dnia (okresy szczytów transportowych i okresy poza szczytowe). Czynniki te mogą być związane z profilem potoku ruchu w różnych warunkach geometrii i gęstości ruchu.



Powyżej opisane czynniki mają również wpływ na wskaźnik fałszywych alarmów, który jest definiowany jako procentowy udział liczby błędnie wykrytych zdarzeń w całkowitej liczbie wykrytych zdarzeń. Czas wykrycia zdarzenia definiuje się, jako przedział czasu od momentu zaistnienia zdarzenia do czasu jego wykrycia. Czułość algorytmów ma wpływ na wartości wskaźników. W przypadku algorytmów, dla których zaobserwowano wysokie wartości wskaźnika wykrywalności, odnotowano wyższe wartości wskaźnika fałszywych alarmów oraz dłuższy czas wykrycia zdarzenia. Jednocześnie w przypadku spadku wartości czasu wykrycia zdarzenia, wzrasta współczynnik fałszywych alarmów.

W procesie wykrywania zdarzeń drogowych niewątpliwie największe znaczenie mają współczynnik wykrywalności oraz czas wykrycia zdarzenia, decydujące o szybkości rozpoczęcia akcji ratowniczej. Analizując wartości wskaźnika fałszywych alarmów (tab.1) można zauważyć, że maksymalna wartość wskaźnika wynosi 3% dla algorytmu przetwarzania obrazu wideo. Dla tak niewielkich wartości wskaźnika można założyć, że podczas porównań algorytmów ma on niewielkie znaczenie.

Wykorzystując zgromadzone informacje o algorytmach wykrywania zdarzeń drogowych opracowano model decyzyjny oparty o zbiór kryteriów związanych zarówno z ich parametrami technicznymi, jak również oceną towarzyszących im wybranych uwarunkowań organizacyjnych i funkcjonalnych.. Strukturę modelu decyzyjnego przedstawia rysunek 2.



Rys. 2 Struktura modelu decyzyjnego na potrzeby wyboru metody wykrywania zdarzeń drogowych

Zgodnie z algorytmem postępowania w metodzie AHP w pierwszej kolejności określono wagę grup kryteriów technicznych, funkcjonalnych i organizacyjnych. Przedstawiają się one następująco:

- kryteria techniczne – 0,634819,
- kryteria organizacyjne – 0,077967,
- kryteria funkcjonalne – 0,287214.

Przedstawiona hierarchia ważności kryteriów odpowiada specyfice analizowanego problemu decyzyjnego. Wykrywanie zdarzeń drogowych za pomocą porównywanych metod wymaga przede wszystkim zapewnienia technicznej sprawności systemu wyrażającej się czasem wykrycia zdarzenia, wykrywalnością oraz udziałem fałszywych alarmów. Nie bez znaczenia jest również kompatybilność systemu z istniejącą infrastrukturą. Przekłada się to na łatwość wdrożenia oraz niższe koszty. Kryteria funkcjonalne związane są z możliwością powiązania wykrywania zdarzeń drogowych z systemami zarządzania ruchem oraz ich odpornością na warunki atmosferyczne. Pierwsze kryterium, w powiązaniu oceną możliwości wykorzystania istniejącej infrastruktury, decyduje o łatwości adaptacji wybranej metody. Odporność na warunki atmosferyczne wpływa zarówno na techniczną sprawność całego systemu, jak i na warunki eksploatacji. Kryteria

organizacyjne zakładają możliwość integracji wybranej metody z systemami innych służb funkcjonujących na danym obszarze oraz weryfikują ilość wdrożeń każdej metody.

### 3.3 Wyniki przeprowadzonej analizy

Kolejnym etapem jest ocena wagi poszczególnych elementów w wyróżnionych kategoriach. Zostały one przedstawione w tabeli 3 w podziale na priorytety lokalne i globalne.

Tab. 3. Lokalne i globalne priorytety wykorzystanych kryteriów

Kryterium	Priorytety lokalne	Priorytety globalne
integracja z innymi systemami zarządzania ruchem	0,20000	0,05744
odporność na warunki atmosferyczne	0,80000	0,22977
ilość wdrożeń	0,24998	0,01949
integracja z systemami innych służb	0,75002	0,05848
czas wykrycia zdarzenia	0,38119	0,24199
fałszywe alarmy	0,14456	0,09177
wykorzystanie istniejącej infrastruktury	0,09304	0,05906
wykrywalność	0,38120	0,24199

Za najważniejsze parametry optymalnej metody wykrywania zdarzeń drogowych uznano wykrywalność, czas wykrycia zdarzenia oraz odporność na warunki atmosferyczne. W dalszej kolejności wskazano na liczbę fałszywych alarmów i wykorzystanie istniejącej infrastruktury. Określona w ten sposób struktura decyzyjna wskazuje na preferencję dla systemów już sprawdzonych w praktyce. Nie wyklucza to jednak uwzględnienia systemów w fazie testów, które na bazie istniejących rozwiązań są łatwo adaptowalne do istniejących warunków technicznych. Jest to również związane z dużym zaangażowaniem ośrodków badawczych i wdrożeniowych ukierunkowanych na badania o charakterze praktycznym. Wykorzystując opisany model i przyjęte kryteria dokonano porównania istniejących metod wykrywania zdarzeń drogowych. Uzyskany wynik dla większej czytelności przedstawiono normalizując kolejne alternatywy przez wynik alternatywy o najwyższym priorytecie:

1. ARIMA	1,0000
2. Bayesian	0,8552
3. Przetwarzanie wideoobrazu	0,7894
4. California	0,7107
5. DES	0,6334
6. APID	0,5606
7. TSC#8	0,4578
8. TSC#7	0,4547
9. McMaster	0,4360
10. Low Pass Filter	0,3763

### 4. WNIOSKI

W referacie przedstawiono teoretyczną symulację procesu wyboru najlepszej z punktu widzenia decydenta metody wykrywania zdarzeń drogowych z wykorzystaniem metody analitycznego procesu hierarchicznego AHP. W procesie AHP porównywano metody stosowane do wykrywania zdarzeń drogowych głównie na autostradach i drogach ekspresowych. Spośród wybranych do analizy algorytmów, które poddano ocenie ze względu na wybrane kryteria techniczne, funkcjonalne i organizacyjne, jako najbardziej atrakcyjne wskazano algorytmy testowane w warunkach laboratoryjnych (ARIMA, Bayesian). Algorytmy testowane w warunkach laboratoryjnych często nie uwzględniają wszystkich czynników, które mogą mieć wpływ na dokładność pomiarów (między innymi wykonania systemu detekcji), stąd wysoka dokładność wykrywalności zdarzeń przy relatywnie niskich wartościach wskaźnika fałszywych wskazań lub czasu wykrycia zdarzenia. Spośród algorytmów wdrożonych w systemach na autostradach, atrakcyjny wydaje się algorytm przetwarzania obrazu wideo (pomimo relatywnie wysokiego wskaźnika fałszywych wskazań, najprawdopodobniej ze względu na niższą odporność na warunki atmosferyczne) oraz California i DES (stosowane w systemach detekcji, wykorzystujących pętle indukcyjne). Wobec zróżnicowanych efektów stosowania poszczególnych algorytmów w różnych warunkach zewnętrznych (parametrów ruchu i drogi, warunków atmosferycznych) zasadna jest fuzja różnych algorytmów pracujących w różnych systemach detekcji (np. pętle indukcyjne i przetwarzanie obrazu wideo), co również można przeanalizować przy wykorzystaniu metody AHP.



## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Lindley J.: *Urban Freeway Congestion: Quantification of the Problem and Effectiveness of Potential Solution*, ITE Journal, January 1987.
- [2] Schrank D., Lomax T.: *The 2002 Urban Mobility Report*, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, TX. June 2002. [http://mobility.tamu.edu/ums/study/final\\_report.pdf](http://mobility.tamu.edu/ums/study/final_report.pdf).
- [3] Et4-024 - Traffic Guidance Systems – November 7, 2006; <http://www.pn.ewi.tudelft.nl/education/et4-024/notes/h12.pdf>.
- [4] Martin T. M., Perrin J., Hansen B.: *Incident Detection Algorithm Evaluation*, University of Utah 2001. <http://www.mountain-plains.org/pubs/pdf/MPC01-122.pdf>
- [5] Ozbay K., Kachroo P.: *Incident Management in Intelligent Transportation Systems*, Artech House, Inc., 685 Canton Street, Norwood MA 02062 1999.
- [6] Persaud Bhagwant N., Hall F.: *Catastrophe Theory and Patterns in 30-second Freeway Traffic Data Implications for Incident Detection*, Transportation Research–A, Vol. 2, (103-113). Pergamon Press, Great Britain 1989.
- [7] Persaud Bhagwant N., Hall F.; Hall L. M.: *Congestion Identification Aspects of the McMaster Incident Detection Algorithm*, Transportation Research Record 1287(167-175) 1990.
- [8] Oskarbski J.: *Wykrywanie zdarzeń drogowych z wykorzystaniem telematyki transportu*, Logistyka nr 6, 2011.
- [9] Saaty T.L.: *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications, Pittsburgh.
- [10] Saaty T. L., Vargas Louis G.: *Decision Making with the Analytic Network Process. Economic, Political, Social, and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. Springer Science&Business Media, 2006r.
- [11] Al-Deek H.: *Final Report, Incident Detection at Freeway Geometric Bottlenecks*, University of Central Florida, 1995. [http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed\\_Proj/Summary\\_TE/0510672\\_B8347.pdf](http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed_Proj/Summary_TE/0510672_B8347.pdf).

