

## ANALIZA STANU NAWIERZCHNI I KLAS POJAZDÓW NA PODSTAWIE PARAMETRÓW EKSTRAHOWANYCH Z SYGNAŁU FONICZNEGO

Karolina MARCINIUK<sup>1</sup>, Bożena KOSTEK<sup>2</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Systemów Multimedialnych  
tel.: 58 3471967, e-mail:karmarci@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Laboratorium Akustyki Fonicznej  
tel.: 58 3472717, e-mail:bokostek@audioakustyka.org

**Streszczenie:** Celem badań jest poszukiwanie parametrów wektora cech ekstrahowanego z sygnału fonicznego w kontekście automatycznego rozpoznawania stanu nawierzchni jezdni oraz typu pojazdów. W pierwszej kolejności przedstawiono wpływ warunków pogodowych na charakterystykę widmową sygnału fonicznego rejestrowanego przy przejeżdżających pojazdach. Następnie, dokonano parametryzacji sygnału fonicznego oraz przeprowadzono analizę korelacyjną w celu przedstawienia separowalności klas na podstawie ekstrahowanych parametrów. W procesie optymalizacji proponowanego wektora cech wykorzystano statystykę Behrensa-Fishera.

**Słowa kluczowe:** analiza ruchu drogowego, parametryzacja sygnałów fonicznych, MIRtoolbox.

### 1. GENEZA BADAŃ

Wzrost natężenia ruchu drogowego wpływa na znaczące pogorszenie się stanu zdrowia mieszkańców dużych miast. Potrzeba kontroli i przeciwdziałania zanieczyszczeniu hałasem narzucana jest przez ustawy Ministerstwa Ochrony Środowiska, jak i Rady Unii Europejskiej. Nadzór akustyczny nad miastami stosowany jest głównie do kontroli poziomu hałasu, innym zastosowaniem jest detekcja niebezpiecznych zdarzeń takich, jak wybuchy, wystrzał z broni palnej, czy wołanie o pomoc [5]. Niektóre systemy sterowania ruchem wprowadzają awaryjne zarządzanie sygnalizacją świetlną w przypadku sygnału dźwiękowego służb publicznych [11].

### 2. METODY ANALIZY RUCHU DROGOWEGO ITS

Pierwszy system ITS (*Intelligent Transportation Systems*) pojawił się w 1928 roku i był to akustyczny detektor wzbudzany dźwiękiem klaksonu (Charls Adler Jr). Zastąpiło to ręczną zmianę świateł. Typowe zastosowanie ITS to zarządzanie ruchem, niwelowanie stłoczenia pojazdów czy też względy prawno-ekonomiczne, jak np. monitoring hałasu, statystyki transportu czy ekologia.

Jednym z podziałów detektorów pojazdów jest rozdzielenie na systemy aktywne, czyli wysyłające sygnał sondujący i pasywne, obserwujące otoczenie. Innym punktem podziału jest sposób montażu – nad drogą lub instalowane w nawierzchni.

### 2.1. Pętle indukcyjne

Najpopularniejszą metodą pomiaru ruchu jest system wykorzystujący pętle indukcyjne. Do najistotniejszych zalet tego typu systemów należy ich cena i odporność na zmiany warunków atmosferycznych i oświetleniowych. Wadą jest głównie sposób instalacji, wymagający trwałego uszkodzenia jezdni, skomplikowana konserwacja oraz naprawa wiążąca się z zamknięciem całej jezdni ze względu na szeregowy sposób przyłączania analizatorów do wspólnej magistrali. Poziom indukcyjności pętli warunkowany jest jej rozmiarem, odległością w parze oraz grubością przewodu. Przykładową parę pętli indukcyjnych pokazano na rysunku 1 (ulica Grunwaldzka w Gdańsku).



Rys. 1. Pętle indukcyjne połączone wspólnym przyłączem do skrzynki z analizatorem

Pętle indukcyjne - na podstawie zakłócenia pola elektro-magnetycznego - pobierają informacje o wymiarach pojazdu. Na zakłócenie pola mają wpływ metalowe elementy podwozia. Detektory te mogą błędnie klasyfikować pojazdy, które przekroczyły pole detekcji zbyt szybko czy też były w trakcie wykonywania manewrów zmiany pasa. Problem mogą również powodować skutery, motocykle oraz pojazdy, których konstrukcja odbiega od norm. Możliwe do uzyskania informacje to wykrycie pojazdu, prędkość, klasa pojazdu, długość pojazdu, czas przebywania na pętli. Szczegółowe zasady działania tych detektorów można znaleźć w materiałach przygotowanych przez Federalną Administrację Autostrad (FHWA) [12]. Do największych rozbieżności dochodzi w godzinach wieczornych, gdy małe natężenie ruchu skutkuje częstym i znaczącym przekraczaniem dozwolonej prędkości przez kierowców.

W trójmiejskim systemie zarządzania ruchem jednym ze źródeł informacji o natężeniu ruchu są właśnie analizatory sygnałów z pętli indukcyjnych. Sensory instalowane są parami na niewralgicznych pasach ruchu, a odczyty z detektorów trafiają do centrum zarządzania ruchem. Analizy

wykonane w ramach niniejszych badań na skrzyżowaniach, na których każdy pas wyposażony był w pętlę indukcyjną wykazały duże rozbieżności dla odczytów z godzin nocnych. W analizie poddano bilans przepływów dla całego skrzyżowania (liczba wjazdów i wyjazdów ze skrzyżowania). Do błędnej detekcji przyczynić się mogła nadmierna prędkość, błędne sklasyfikowanie pary pojazdów jako pojazd z przyczepą. Dlatego dane pochodzące z systemu pętli indukcyjnych nie mogą w pełni służyć jako *ground truth* w tego typu pomiarach. Wybrane wartości skuteczności pomiarów zamieszczono w tablicy 1.

Tablica 1 Przykładowe skuteczności dla bilansu przepływów dla skrzyżowania zaopatrzonego w pętlę indukcyjne Grunwaldzka-Miszewskiego-Jaśkowa Dolina

Godzina	Największa liczba wpłynięć	Różnica przepływu	Różnica względem maks. przepływu [%]
1:00-1:59	524	42	8,02
6:00-6:59	2004	8	0,40
7:00-7:59	2509	115	4,58
13:00-13:59	4797	55	1,15
15:00-15:59	3954	33	0,83
23:00-23:59	965	0	0
<b>Dla całej doby:</b>	<b>60849</b>	<b>475</b>	<b>(średnio) 1,94</b>

## 2.2. Inne systemy ITS i skuteczność ich detekcji

Skuteczność detektora zależy od jego właściwości, zaś w przypadku pętli indukcyjnych duży wpływ ma stan techniczny instalacji. Duże zagęszczenie pojazdów ciężarowych oraz ich wydłużony czas przebywania na pętli może uszkodzić jej konstrukcję, stąd też duża część systemów sterowania światłami wprowadza przyspieszony cykl w przypadku pojazdu ciężarowego.

W przypadku kamer wizyjnych największym problemem jest duża wrażliwość na warunki oświetleniowe oraz wzajemne przesłanianie się pojazdów. Kamera może przechwycić prędkość, typ, kolor, pojazdu czy numery tablic rejestracyjnych. Z kolei detektory akustyczne mogą mieć trudności przy dużym natężeniu pojazdów (zaleca się stosowanie macierzy mikrofonów) oraz w przypadku zatoru drogowego, gdzie jedyną składową dźwięku jest hałas generowany przez silnik. Akustyczna detekcja pojazdów znajduje również zastosowanie w systemach militarnych [1].

Głównym problemem pasywnych akustycznych detektorów pojazdów jest znalezienie odpowiedniego kompromisu między ceną, jakością i kompaktowością systemu pomiarowego. Większość sensorów składa się z macierzy mikrofonów (nawet 150 sztuk), przy czym ceny za jeden w pełni funkcjonalny układ pomiarowy wahają się w granicach kilkudziesięciu tysięcy złotych. Zrozumiałe jest więc poszukiwanie tańszych, równie skutecznych urządzeń pomiarowych, wspomaganych przez inne sensory (detekcja sygnałów sejsmicznych [1], [2]).

## 2.3. Akustyczna detekcja pojazdów

Dźwięk emitowany przez poruszający się pojazd zależy od szeregu czynników. W kontekście ochrony środowiska na model źródła hałasu drogowego składa się przede wszystkim hałas silnika oraz hałas toczenia. Przy niskich prędkościach dominuje niskoczęstotliwościowy dźwięk silnika (zależy od obrotów i liczby cylindrów, im większa liczba, tym wyższa częstotliwość). Przy wyższych

częstotliwościach dominuje efekt związany z kontaktem opony z jezdnią, który wraz z mało znaczącym w mieście efektem aerodynamicznym wprowadza zmiany w charakterystyce widmowej w paśmie średnich i wysokich częstotliwości.

## 3. EKSTRAKCJA PARAMETRÓW

*Music Information Retrieval* jest dziedziną zajmującą się analizą i klasyfikacją utworów muzycznych. Popularne zastosowanie tej technologii stanowią algorytmy rozpoznające utwory muzyczne na podstawie zadanej próbki sygnału (fragment utworu, zanucenie, zagwizdanie, ang. *Query-by-Example* czy *Query-by-Humming/Whistling*). Algorytmy tego typu są również wykorzystywane w celu ochrony praw autorskich w muzycznych systemach społecznościowych, w oprogramowaniu służącym poprawie brzmienia systemów odsłuchowych w zależności od gatunku muzycznego oraz do sugerowania utworów podobnych brzmieniowo [3-4] czy wywołujących te same emocje [9].

MIRtoolbox jest jedną z bezpłatnych otwartych wtyczek do analizy i parametryzacji nagrań muzycznych, przeznaczoną dla środowiska MATLAB. Pomimo, iż hałas powodowany przejazdem pojazdu ma odmienny charakter niż sygnał muzyczny, zdecydowano się na zastosowanie tego samego podejścia w parametryzacji sygnałów zarejestrowanych w bliskiej odległości od drogi. Dokonano ekstrakcji 21 parametrów czasowych i widmowych (patrz tab. 1). W przypadku analizy widmowej brano pod uwagę całe pasmo akustyczne, szerokość ramki analizy wynosiła 25 ms, z nakładkowaniem. W wektorze cech zawarto również wartości średnie obliczanych parametrów oraz wariancje. Wynikowy wektor cech otrzymuje się po dalszej obróbce statystycznej, tj. wykorzystując analizę Behrensa-Fishera (B-F) do redukcji silnie skorelowanych parametrów. Wartości parametrów będące uśrednieniem wyników z poszczególnych ramek sygnału integrują informacje o typie, prędkości i pogodzie. Innym podejściem może być wyznaczanie parametrów dla ramek o najwyższym poziomie dźwięku i zestawienie ich z wartościami średnimi w kontekście liczby ramek składających się na jeden przebieg pojazdu, dekodując tym samym orientacyjną prędkość pojazdu.

## 3.1. Charakterystyka zebranych danych

W badaniu użyto danych audio-wizyjnych zarejestrowanych w trzech lokalizacjach. Były to kolejno: osiedlowa ulica z dopuszczalną prędkością 50 km/h, czteropasmowa jezdnia rozdzielona 10-metrowym pasem zieleni z dopuszczalną prędkością 70 km/h oraz droga dwupasmowa z dopuszczalną prędkością 90 km/h. W trzeciej dostępnej lokalizacji, badania powtórzono w warunkach mokrej jezdni.

Analizie parametrycznej poddano 70 plików dźwiękowych. Poszczególne klasy sygnałów porównano w analizach korelacyjnych. Wydzielono klasę pojazdów lekkich i ciężkich, przejazdy przy suchej i mokrej nawierzchni.

Nagrania foniczne rejestrowane były urządzeniem ZOOM H6 z mikrofonem kierunkowym typu shotgun, parametry sygnałów fonicznych wynosiły odpowiednio 96 kHz (częstotliwość próbkowania) i 24 bity (rozdzielczość).

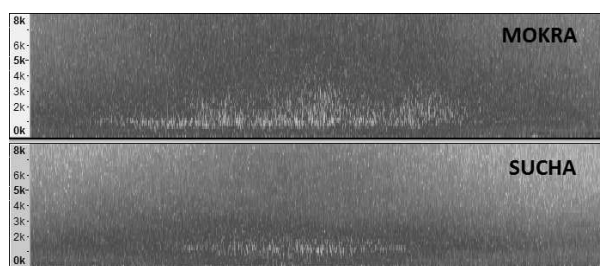
Na podstawie odczytu z kamery możliwe było wyznaczenie prędkości i typu pojazdu, oraz kierunku jazdy. Rejestracja materiału odbywała się w rozdzielczości HD z prędkością 50 klatek na sekundę. Znajomość parametrów

optycznych oraz określenie szerokości fragmentu jezdni, znajdującego się w kadrze pozwoliło na pomiar prędkości z błędem mniejszym niż wymagane 3 km/h dla prędkości do 100 km/h (matryca APS-C, ogniskowa 35 mm, odległość od obiektu 14 m, szerokość kadru na środku jezdni 9 m, wyznaczona różnica szerokości dla dalszego pasa i bliższego to 1,3 m, kąt widzenia w poziomie 36°).

### 3.2. Analizy korelacyjne dla różnych stanów nawierzchni

Ocena stanu nawierzchni jezdni jest kluczowym elementem bezpieczeństwa ruchu drogowego [10]. Część newralgicznych miejsc sieci drogowej objęta jest stałym, zaawansowanym monitoringiem meteorologicznym. Należy jednak dodać, że takie rozwiązanie jest drogie.

Dźwięk generowany przez pojazd jadący po mokrej nawierzchni jest łatwy w klasyfikacji przez ucho ludzkie. Zmniejszone tarcie spowodowane obecnością wody, możliwe jest do zaobserwowania również w widmie sygnału audio, co zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Obecność wysokoczęstotliwościowych składowych w przypadku mokrej nawierzchni

Zebrane próbki podzielono na dwie klasy – próbki zarejestrowane przy suchej i mokrej nawierzchni, w proporcji 50:20. W zbiorze próbek znajdowały się różne typy pojazdów, pominięto różnice prędkości.

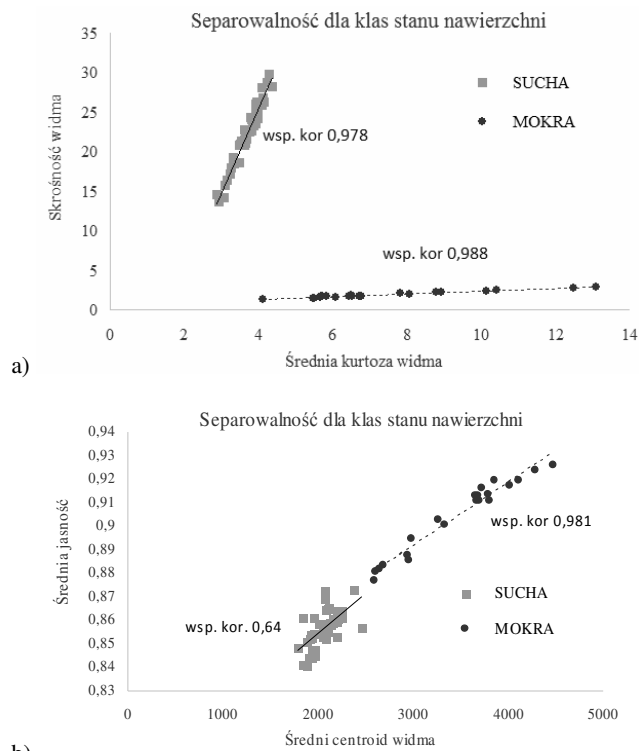
Wyznaczono 21 parametrów: 13 współczynników mel-cepstralnych (MFCC), pozostałe parametry opisują zarówno widmo sygnału, jak i jego postać w dziedzinie czasu. Przykłady wartości parametrów wraz z wartościami średnimi i odchyleniami standardowymi dla danej klasy zamieszczono w tabeli 2.

Tablica 2 Wynik średnich i odchylenia standardowego populacji dla nawierzchni suchej i mokrej

Stan nawierzchni:	SUCHA		MOKRA	
	SD ( $\sigma$ )	Średnia	SD ( $\sigma$ )	Średnia
Parametr				
MFCC 1'	0,265	2,517	0,464	1,223
MFCC 2'	0,253	-1,496	0,418	-0,993
...	...	...	...	...
MFCC 12'	0,064	0,023	0,055	0,011
MFCC 13'	0,051	0,027	0,077	-0,006
Kurtoza widma	3,852	22,285	2,389	7,457
Płaskość widma	0,016	0,090	0,039	0,166
Entropia	0,007	0,857	0,016	0,904
Środek ciężkości (ang. <i>centroid</i> )	139,16	2066,94	575,57	3465,39
Skośność widma (ang. <i>skewness</i> )	0,352	3,691	0,435	1,898
Średnia liczba przejść przez zero	130,53	1261,50	347,09	2095,33
Średnia energia w niskim paśmie	0,062	0,551	0,050	0,549
Średnia jasność (ang. <i>brightness</i> )	0,092	0,513	0,034	0,449

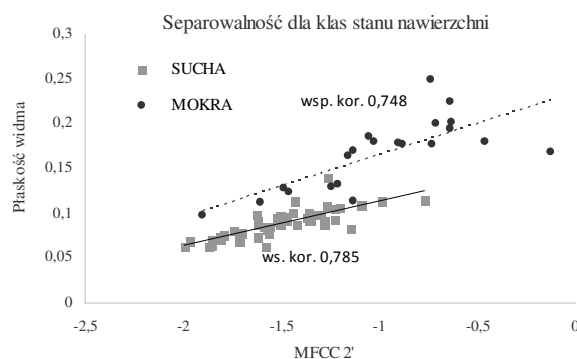
Duże znaczenie w kontekście parametryzacji nagrań pojazdów odgrywała śr. wartość kurtozy widma, czyli moment centralny czwartego rzędu. Drugim znaczącym parametrem jest środek ciężkości widma, określane jako jasność (ang. *brightness*). Jego wartość zależy od energii powyżej zadanej częstotliwości. W prowadzonych badaniach przyjęty próg wynosił 1500 Hz.

Wyniki separowalności klas pojazdów w kontekście stanu nawierzchni jezdni przedstawiono na rysunkach 3-4.



Rys. 3. Separowalność parametrów ekstrahowanych z zarejestrowanych próbek fonicznych dla różnej wilgotności jezdni: (a) śr. kurtoza widma i wartość średnia skrośności widma (ang. *skewness*) oraz (b) wartość śr. ciężkości widma i śr. jasność widma

Jako miarę odległości pomiędzy testowanymi klasami wykorzystano test Behrensa-Fishera ( $V$ ). Ze względu na przekroczenie warunku krytycznego odrzucono niektóre analizowane pary parametrów.

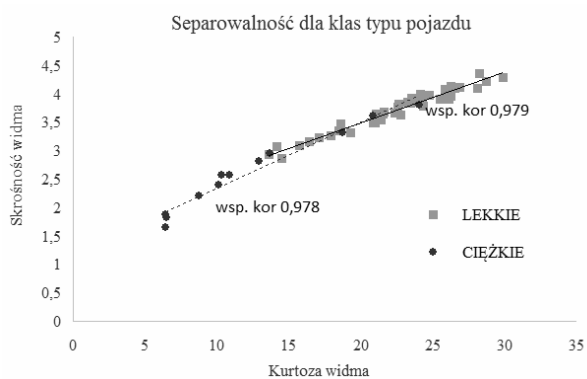


Rys. 4. Separowalność ścieżek fonicznych nagranych dla mokrej i suchej jezdni (test Behrensa-Fishera)

### 3.4. Analizy korelacyjne dla różnych typów pojazdów

Systemy klasyfikacji pojazdów zawierają zwykle do ośmiu typów pojazdów. W przypadku prowadzonych badań, wydzielono dwie główne klasy – pojazdy lekkie i ciężkie. Druga z wymienionych klas stanowi średnio 5% ogólnego

natężenia pojazdów, stąd istnieją znaczące dysproporcje między liczebnościami poszczególnych grup (58:12 ścieżek dźwiękowych). Jako warunek separowalności wybrano parę parametrów charakteryzującą się stosunkowo dużą różnicą wartości średnich i małymi odchyleniami standardowymi dla obu klas. Wynik dla jednej z wyselekcjonowanych w ten sposób par zamieszczono na rys. 5. Niski poziom separowalności klas może być spowodowany różnorodnością nagrań (tj. różne lokalizacje, różna szybkość poruszania się pojazdów, itp.).



Rys. 5. Separowalność próbek fonicznych dla różnych typów pojazdów

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Akustyczny nadzór nad drogą umożliwia określenie stanu nawierzchni stosunkowo niskim kosztem. Wyposażenie systemów akustycznej detekcji o moduł analizy natężenia ruchu może dodatkowo wspomóc bezpieczeństwo ruchu drogowego. Wstępne analizy wskazały na potrzebę rozbudowania bazy danych, szczególnie w kontekście typów pojazdów warunkowanych prędkością przejazdu. Ponadto przeprowadzone eksperymenty potwierdziły konieczność dalszych prac nad optymalizacją wektora cech. W przypadku analizy ilościowej pojazdów w rejonie skrzyżowań większą skuteczność można osiągnąć poprzez analizę poziomu hałasu niż w procesie rozpoznawania indywidualnych pojazdów wyłonionych z tła akustycznego [7]. Etap ekstrakcji cech jest bardzo ważnym elementem systemu decyzyjnego i dlatego działania ukierunkowane na optymalizację wektora cech mogą mieć decydujące znaczenie w uzyskaniu dobrej efektywności algorytmu uczącego się.

#### 5. PODZIĘKOWANIA

Badania były prowadzone w ramach projektu NCBiR nr OT4-4B/AGH-PG-WSTKT.

### DETERMINING THE ROAD SURFACE CONDITION AND TYPE OF VEHICLES ON THE BASIS OF DATA EXTRACTED FROM AUDIO SIGNAL CHARACTERISTICS

The aim of this study is to find a feature vector for an automatic recognition of road surface conditions and the type of vehicles, extracted from an audio signal. First, the influence of weather-based conditions of road surface on spectral characteristic of the audio signal recorded from a passing vehicle in close proximity to the road is shortly discussed. Next, parameterization of the recorded audio signal is performed and examples of the correlation analyses are presented in the context of the class separability. Behrens-Fisher statistics is used to find the most suitable parameters that may be contained in the optimized feature vector.

**Keywords:** Intelligent Transportation Systems (ITS), parametrization of audio signals, MIRtoolbox.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

1. Altmann J., Linev S., Weiss A.: Acoustic–seismic detection and classification of military vehicles—developing tools for disarmament and peace-keeping. *Applied Acoustics*, Tom 63, numer 10, październik 2002, s. 1085-1107.
2. Evans N.: *Automated Vehicle Detection and Classification using Acoustic and Seismic Signals*, rozprawa doktorska 2010.
3. Hoffmann P., Kostek B.: Music Genre Recognition in the Rough Set-Based Environment, *Pattern Recognition and Machine Intelligence*, tom 9124, s. 377-386.
4. Kostek B., Hoffmann P., Kaczmarek A., Spaleniak P.: *Creating a Reliable Music Discovery and Recommendation System*, *Intelligent Tools for Building a Scientific Information Platform: From Research to Implementation*, Springer, 2014, s. 107-130.
5. Kotus J., Łopata K., Czyżewski A.: Detection and localization of selected acoustic events in acoustic field for smart surveillance applications, *Multimedia Tools and Applications*, 2012, s. 1–17.
6. Kurowski A., Marciniuk K., Kostek B.: Separability Assessment of Selected Types of Vehicle-Associated Noise", *The 10th edition of International Conference on Multimedia & Network Information Systems*. 14-16 September 2016, Wrocław, Poland.
7. Marciniuk K., Kostek B.: Creating a numerical model of noise conditions based on the analysis of traffic volume changes in cities with low and medium structure, *Archives of Acoustics*, ISSN: 0137-5075, Vol 40, no. 3, 2016, s.438 – 439.
8. MIRtoolbox 1.5 User's Manual, retrieved from <https://www.jyu.fi/hum/laitokset/musiikki/en/research/oe/materials/mirtoolbox/MIRtoolbox1.5Guide>, access date: 04.08.2016.
9. Plewa M., Kostek B.: Graphical representation of music set based on mood of music, *XVI Międzynarodowe Sympozjum Inżynierii i Reżyserii Dźwięku ISSET'2015*, ISBN: 978-83-933558-8-4, 2015, s. 244-250.
10. Rondon A., "The impact of weather conditions on urban travel speed using ANPR observations", *Royal Institute of Technology*, Stockholm, Sweden 2014.
11. Swathi T., Mallu Veera B.: Emergency Vehicle Recognition System, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, Vol. 4.4, kwiecień 2013, s. 987-990.
12. *Traffic detectors handbook*, 3th edition, FHWA-HRT-06-108, May 2006.