

Józef Suda
Wydział Transportu, Politechnika Warszawska

Adam Kłos
Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

BADANIE I OCENA ZINTEGROWANEGO DETEKTORA POJAZDÓW

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodę i wyniki oceny zintegrowanego detektora pojazdów. Badane urządzenie reprezentuje najnowszy trend budowy detektorów. W jednym urządzeniu zastosowano kilka metod detekcji. W badanym urządzeniu wykorzystano: pasywną podczerwień (PIR), ultradźwięki i elektromagnetyczne promieniowanie mikrofalowe. Celem badań było określenie dokładności, z jaką detektor pojazdów TT 298 pozyskuje dane. Ocenie poddano: zliczania pojazdów, określanie struktury rodzajowej, pomiar i prędkości pojazdów. Analizowano funkcjonalność urządzenia, łatwość gromadzenia i analizy wyników pomiarów.

Słowa kluczowe: ITS, badania ruchu drogowego, urządzenia pomiarowe, detektory pojazdów.

1. WPROWADZENIE

Sterowanie ruchem drogowym - jako dziedzina wiedzy – zyskało na znaczeniu w drugiej połowie minionego stulecia, w wyniku nagłego wzrostu liczby środków transportu.

Zaawansowane podsystemy ITS takie jak: systemy informacji dla podróżnych, systemy sterowania na drogach szybkiego ruchu i w sieci ulic, systemy reagowania na sytuacje awaryjne, systemy zarządzania miejscami parkingowymi coraz efektywniej wykorzystują dane, które odzwierciedlają bieżące warunki ruchu [1]. Detektory pojazdów, które takie dane pozyskują, są integralną częścią każdego nowoczesnego systemu zarządzania ruchem drogowym [5].

Nie ma jednego, uniwersalnego urządzenia, optymalnego dla wszystkich zastosowań. Oprócz pętli indukcyjnych stosowane są detektory magnetyczne, wideo detektory, detektory mikrofalowe, ultradźwiękowe, detektory podczerwieni (PIR), pneumatyczne, piezoelektryczne, laserowe, ultradźwiękowe i wiele innych [6].

Jak w każdej dziedzinie techniki występuje ciągły postęp, udoskonalane są istniejące metody detekcji, a także proponowane są nowe technologie i urządzenia [8].

W artykule przedstawiono metodę i wyniki oceny zintegrowanego detektora pojazdów. Badane urządzenie reprezentuje najnowszy trend budowy detektorów, gdy w jednym urządzeniu wykorzystano: trzy metody detekcji. W Polsce nie wykonywano oceny takiego typu detektora. Praktycznym efektem prezentowanych prac było przygotowanie stanowiska do badań parametrów ruchu drogowego wykorzystywanego do celów dydaktycznych i prowadzenia prac badawczych [9].

2. OPIS ZINTEGROWANEGO DETEKTORA POJAZDÓW

Szwajcarska firma Asim przekazała Wydziałowi Transportu detektor TT 298, w celu wykonania badań i wykorzystania przez studentów profilu Sterowanie Ruchem Drogowym w ramach laboratorium z przedmiotu „Pomiary w ruchu drogowym” i przy realizacji własnych prac badawczych.

Detektory z serii TT 290 łączą w jednym urządzeniu – detekcję wykorzystującą mikrofałę, detekcję ultradźwiękową oraz detekcję promieniowania podczerwonego. Sygnały są osobno przetwarzane przez mikroprocesor, Porównanie danych otrzymanych z każdego czujnika umożliwia weryfikację prawidłowego funkcjonowania urządzenia.

2.1. Zasada działania detektora TT 298

Część mikrofalowa urządzenia umożliwia pomiar prędkości pojazdów, wykorzystując „efekt Dopplera”. Czujnik ultradźwiękowy skanuje profil pojazdu, aby określić jego typ. Wielokanałowy pasywny czujnik promieniowania podczerwonego umożliwia przyporządkowanie pozyskiwanych informacji do konkretnego pasa oraz uruchamia detekcję ultradźwiękową. Detekcja wykorzystująca promieniowanie podczerwone pozwala zidentyfikować pojazdy jadące po linii rozdzielającej pasy oraz pojazdy, które zmieniają pas ruchu.

Struktura rodzajowa określana jest na podstawie długości oraz kształtu obrysu pojazdu. Detektor TT 298 wyróżnia osiem klas pojazdów. Pojazdy, których nie udało się przyporządkować, zaliczane są do dodatkowej grupy - niezidentyfikowane. Zwykle są to pojazdy, które przemieszczały się znajdując się całkowicie w strefie detekcji.

2.2. Strefy detekcji detektora TT 298

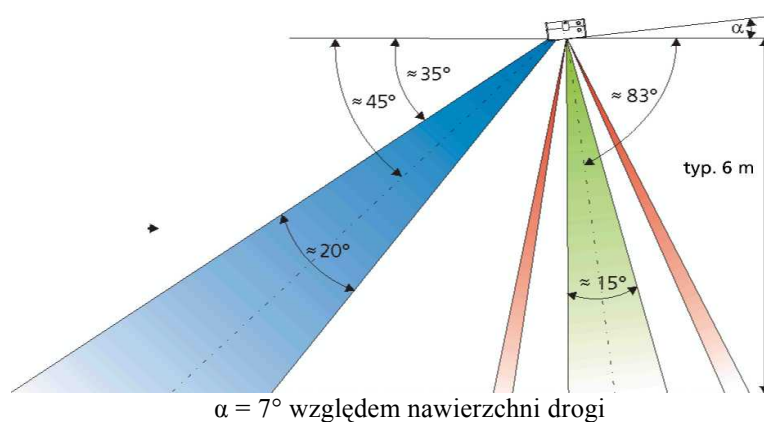
Mikrofalowy czujnik detektora tworzy obszar detekcji w kształcie stożka. Czujnik promieniowania podczerwonego tworzy dwie wielokanałowe „kurtyny”. Pomiędzy „kurtynami” czujnika PIR znajduje się strefa detekcji czujnika ultradźwiękowego, która jest w kształcie stożka. Wielkość czterech stref detekcji zależy od wysokości zamocowania detektora.

Jeżeli detektor jest zainstalowany zgodnie ze wskazówkami producenta, szerokości poszczególnych stref pozwalają na detekcję pojazdów na jednym pasie ruchu.

Aby uzyskać dokładny pomiar, detektor musi być zamocowany stabilnie. Wibracje oraz oddziaływania wiatru powinny być ograniczone do minimum.

Aby działanie detektora było prawidłowe pojazdy muszą przejeżdżać przez wszystkie strefy detekcji (radar Dopplera, stożek ultradźwiękowy i kurtyny podczerwieni) w odpowiedniej kolejności, przy czym pojazdy z sąsiednich pasów nie mogą wjeżdżać w obszar żadnej ze stref detekcji. Rekomendowana wysokość instalacji dla modelu TT 298 to 5 ... 6 m (16 ... 20 ft) w zależności od szerokości pasa jezdni.

Zaleca się, aby detektor w standardowej wersji *L* działał w trybie *Frontfire-mode* (instalacja za konstrukcją wsporczą nad drogą, stożek tworzony przez fale radaru ukierunkowany jest naprzeciw nadjeżdżających pojazdów). Taki sposób mocowania umożliwia pozyskanie najbardziej dokładnych danych.



Rys. 1. Wzajemne rozmieszczenie stref detekcji [4]

3. BADANIE ZINTEGROWANEGO DETEKTORA POJAZDÓW

Celem badań było określenie dokładności, z jaką detektor pojazdów TT 298 pozyskuje dane. Ocenie poddano następujące funkcje urządzenia:

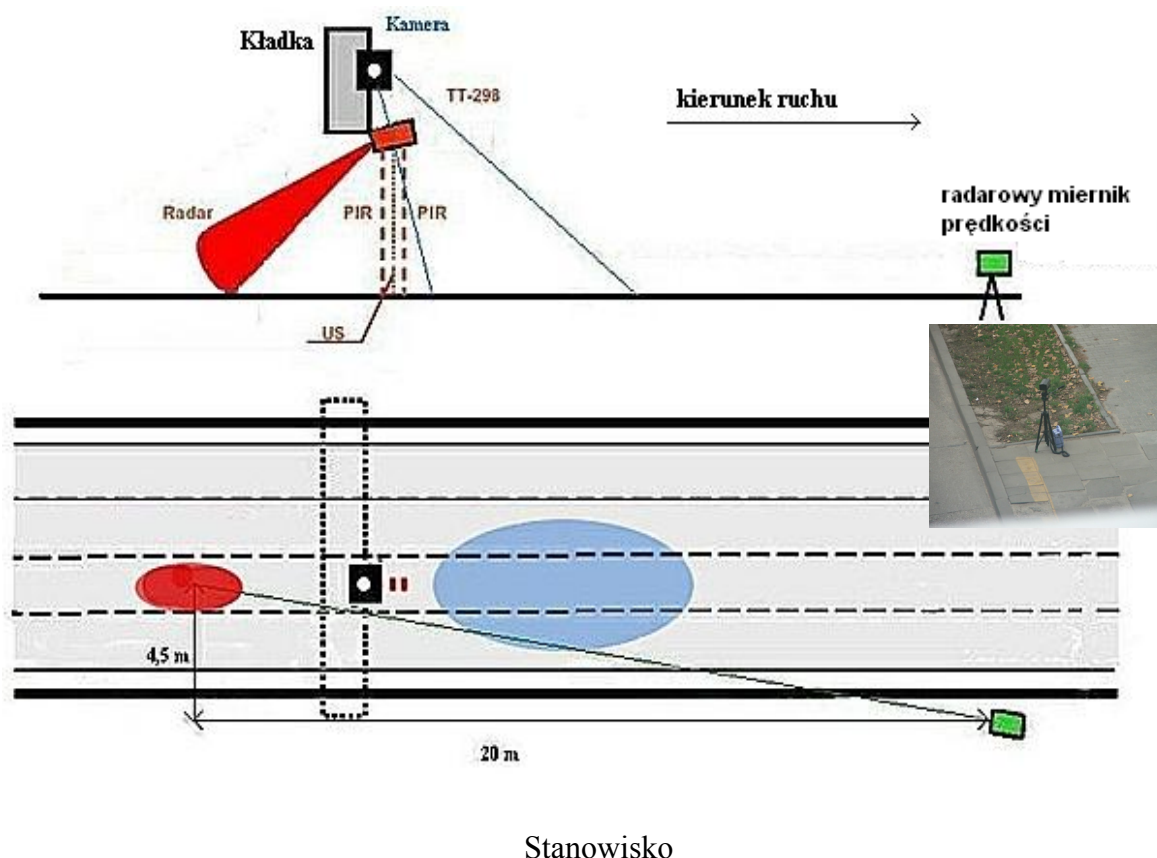
- ✓ liczenie pojazdów,
- ✓ określanie struktury rodzajowej pojazdów,
- ✓ pomiar prędkości pojazdów.

Ocenie poddano funkcjonalność i wygodę w gromadzeniu i analizie wyników.

2.2. Miejsce i technologia pomiarów

Pomiary wykonano w Warszawie, na Pradze, na ulicy Płowieckiej. Punkt pomiarowy umieszczono na kładce dla pieszych nad ul. Płowiecką na wysokości ul. Edisona; kierunek do Centrum. Na tym kierunku znajdują się cztery pasy ruchu. Detektor został umieszczony nad drugim pasem licząc od strony chodnika (prawy, skrajny pas jest wykorzystywany przez autobusy oraz pojazdy włączające się do ruchu) [7]. Detektor przymocowano do

bariery kładki dla pieszych, w stronę nadjeżdżających pojazdów (rys. 2) tak, aby oś wiązki promieniowania mikrofalowego padała pod kątem 45° .



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego [7]

Na stanowisko pomiarowe składają się następujące urządzenia:

- ✓ zintegrowany detektor TT 298 (podłączony do zasilacza i laptopa),
- ✓ radarowy miernik prędkości – Rapid 1,
- ✓ kamera cyfrowa DVD.

Radarowy miernik prędkości służył do weryfikacji pomiarów prędkości dokonanych przez detektor. Miernik prędkości został skierowany w miejsce, w którym znajdowała się strefa detekcji czujnika mikrofalowego detektora TT 298. Wyniki pomiarów skorygowano, ze względu na kąt, pod którym skierowany był radarowy miernik prędkości. Całość badań zarejestrowana została na nośniku cyfrowym przy użyciu kamery video w celu wzrokowej weryfikacji poprawności wskazań detektora (liczenie pojazdów, określanie typu pojazdów).

Zegar rejestratora danych został zsynchronizowany z zegarem kamery. Pozwoliło to na weryfikację działania detektora (w zakresie liczenia pojazdów oraz klasyfikacji) w odniesieniu do każdego pojazdu z osobna. Weryfikacja poprawności zliczeń została wykonana dla 1005 pojazdów. Z tej liczby 61 pojazdów mimo wykrycia nie zostało sklasyfikowanych – powód był zawsze ten sam - zbyt mała część pojazdu znajdowała się

w obszarze detekcji. Weryfikacja klasyfikacji dokonanej przez detektor została przeprowadzona na próbie 944 pojazdów.

Ocena dokładności pomiaru prędkości polegała na porównaniu wyników uzyskanych przez detektor TT 298 i miernik referencyjny. Ocena dokładności pomiaru prędkości została dokonana dla 235 pojazdów (po odrzuceniu wyników pomiarów niepewnych).

4. OCENA ZINTEGROWANEGO DETEKTORA POJAZDÓW

4.1. Liczenie i klasyfikacja pojazdów

Analiza poprawności zliczania i klasyfikacji polegała na porównaniu wyniku z detektora z obrazem wideo. Przyporządkowanie pojazdów do odpowiednich klas na podstawie ich wyglądu nie jest precyzyjne. Niekiedy nie można określić czy dany pojazd jest jeszcze samochodem dostawczym czy już ciężarowym; w wielu przypadkach rozstrzygnąć mogłaby tylko informacja o jego masie. Przyjęto, że pojazdy, co do których trudno jest precyzyjnie określić klasę (na podstawie obserwacji) uznaje się za sklasyfikowane prawidłowo, jeśli detektor przyporządkował dany pojazd do jednej z rozpatrywanych klas. Ocena klasyfikacji została przeprowadzona dla pojazdów, których większa część obrysu znajdowała się w obszarze detekcji ograniczonym liniami rozdzielającymi pasy jezdni.

Detektor mimo wykrycia nie sklasyfikował 61 pojazdów (z łącznej liczby 1005 zarejestrowanych pojazdów). Nie stwierdzono, by pojazdy, których obrys w większości zawarty był w strefie detekcji, nie zostały sklasyfikowane. Weryfikacja klasyfikacji dokonanej przez detektor odbyła się na próbie 944 pojazdów.

Pojazdy, które znajdowały się bardzo blisko monitorowanego pasa, nie powodowały błędów w detekcji. Przykładem jest sytuacja, gdy na sąsiednim pasie został zaparkowany ciągnik z naczepą. Nie spowodowało to zakłóceń w pracy detektora.

4.3. Wskaźniki oceny klasyfikacji pojazdów

Dla oceny detektora wprowadzono wskaźniki jakości detekcji, które określały skuteczność detekcji. Pierwszym, najbardziej intuicyjnym wskaźnikiem jest stosunek liczby pojazdów klasy x poprawnie zidentyfikowanych przez detektor (zweryfikowanej na podstawie analizy zapisu wideo) do całkowitej liczby pojazdów klasy x (obliczonej na podstawie analizy zapisu wideo).

$$E1_x = \frac{M_x}{L_x} \quad (1)$$

$E1_x$ – wskaźnik określający poprawność klasyfikacji pojazdów typu x,

M_x – liczba poprawnie zidentyfikowanych pojazdów klasy x przez detektora

L_x – całkowita liczba pojazdów danej klasy (obliczona na podstawie anali

Ponieważ przebadana może zostać jedynie ograniczona liczba pojazdów wykorzystywany jest rozkład dwumianowy, aby określić wskaźnik skuteczności klasyfikacji z ufnością 95% [2]:

$$P_{E1,x} = \frac{Z \cdot M_x + Z^2 - Z \cdot \sqrt{Z^2 + 4 \cdot M_x \left(1 - \frac{M_x}{L_x}\right)}}{2 \cdot (L_x + Z^2)}, \quad (2)$$

$P_{E1,x}$ – skuteczność detekcji (dla wskaźnika E1) uwzględniający wielkość próby,
 M_x – liczba poprawnie sklasyfikowanych pojazdów klasy x,
 Z – 1,96 (wartość odzwierciedla 95% współczynnik ufności z dużej liczby próbek),
 L_x – całkowita liczba pojazdów klasy x.

Po przekształceniu wzoru (2) otrzymano przedział, w którym zawiera się parametr skuteczności detekcji na żądanym poziomie ufności (definiowany przez parametr Z) [2]:

$$\frac{1}{L_x + Z^2} \cdot \left(M_x + \frac{Z^2}{2} - Z \cdot \sqrt{M_x \cdot (1 - E1) + \frac{Z^2}{4}} \right) \leq E1 \leq \frac{1}{L_x + Z^2} \cdot \left(M_x + \frac{Z^2}{2} + Z \cdot \sqrt{M_x \cdot (1 - E1) + \frac{Z^2}{4}} \right) \quad (3)$$

Czynnikiem, który rzutuje na jakość klasyfikacji pojazdów jest błędne przyporządkowywanie przez detektor pojazdów innych klas do określonej klasy x. Aby przeanalizować wpływ błędnie przyporządkowanych pojazdów lub fantomów (pojazdów, których w rzeczywistości nie było, ale zostały zarejestrowane przez detektor) na wiarygodność klasyfikacji należy wprowadzić dodatkowy wskaźnik - $E2_x$ gdzie:

$$E2_x = \frac{M_x}{C_x} \quad (4)$$

$E2_x$ – wskaźnik określający poprawność klasyfikacji pojazdów typu x, uwzględniający błąd wynikły z przydzielaniem pojazdów innych klas do rozpatrywanej klasy x,
 M_x – poprawnie zidentyfikowane pojazdy klasy x przez detektor,
 C_x – całkowita liczba pojazdów danej klasy zarejestrowanych przez detektor.

W tabelicy 1 w kolumnie *poj. z wideo* podano % pojazdów każdego z typów stwierdzona na wideo. W następnych kolumnach podano % pojazdów rozpoznane przez detektor. Suma pojazdów przekracza 100%, ponieważ doliczono fantomy. W tabelicy 2 przedstawiono wartości wskaźników E1 i E2 wyznaczonych dla każdego typu pojazdu. W tabelicy 3 przedstawione są przedziały, w których znajduje się wskaźnik E1 dla współczynnika ufności¹ $(1-\alpha) = 95\%$.

¹ Współczynnik ufności $1 - \alpha$ jest to prawdopodobieństwo, że rzeczywista wartość rozpatrywanego parametru w populacji znajduje się w wyznaczonym przedziale ufności.

Tablica 1.

Udział procentowy pojazdów danego typu zaobserwowanych na obrazie wideo i ich klasyfikacja przez detektor [opracowanie własne]

Typ pojazdu	pojazdy z wideo [%]	Pojazdy sklasyfikowane przez detektor [%]							
		Motocykl	Osobowe	Dostawcze	osob. z przycz.	Ciężarowe	ciężarowe z przycz.	ciągnik z nacz.	autobusy
motocykle		-	-	-	-	-	-	-	-
osobowe	81,78	0,65	99,35	-	-	-	-	-	-
dostawcze	10,28	-	4,12	94,85	1,03	-	-	-	-
os. z przycz.	0,53	-	-	-	60,00	40,00	-	-	-
ciężarowe	3,39	-	-	3,13	-	90,63	-	-	6,25
ci. z przycz.	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
ciąg z nacz.	2,65	-	-	-	-	8,00	-	88,00	4%
autobusy	1,38	-	-	-	-	15,38	-	-	84,62
„fantomy”	0,21	-	50,00	50,00	-	-	-	-	-
Suma	100,21	-	-	-	-	-	-	-	-

Tablica 2

Wartości wskaźników (w procentach) E1 i E2 dla różnych klas pojazdów [opr. własne]

Klasa	motoc.	osobowe	dostawcze	os. z przycz.	ciężarowe	ciężarowe z przycz.	ciągnik z nacz.	autobusy
E1(%)	-	99,35%	94,85%	60%	90,63%	-	88%	84,62%
E2(%)	-	99,35%	97,87%	75%	82,86%	-	100%	78,57%

Przedziały zostały wyznaczone zgodnie z wzorem 3. Szerokość przedziału jest zależna od liczebności prób, przedziały dla pojazdów, które częściej były wykrywane (samochody osobowe, dostawcze) są „węższe” i pozwalają miarodajnie ocenić skuteczność detekcji.

Tablica 3

Przedziały, w których znajduje się wskaźnik skuteczności detekcji E1 dla $\alpha = 0,05$ [opr. własne]

klasa	współczynnik ufności $(1-\alpha) = 95\%$
motocykle	-
osobowe	98,50% $\leq E1 \leq$ 99,72%
dostawcze	88,50% $\leq E1 \leq$ 97,78%
os. z przycz.	23,07% $\leq E1 \leq$ 88,24%
ciężarowe	75,78% $\leq E1 \leq$ 96,76%
ciężarowe z przycz.	-
ciąg z nacz.	70,04% $\leq E1 \leq$ 95,83%
autobusy	57,76% $\leq E1 \leq$ 95,67%

Detektor wykrył 1005 pojazdów, dwa z nich okazały się fantomami, a 61 nie zostało sklasyfikowanych, gdyż większa część ich znajdowała się na innym pasie. Gdyby przekrój pomiarowy wyposażony był w detektory na wszystkich pasach, można z dużym przyjąć, że pojazd, zostałyby sklasyfikowane na pasie sąsiednim. Aby otrzymać rzeczywistą liczbę zarejestrowanych pojazdów w danej lokalizacji należy uwzględnić tylko pojazdy sklasyfikowane. W trakcie pomiarów urządzenie wykryło 946 pojazdów. Na podstawie analizy zapisu wideo stwierdzono przejazd 944 pojazdów. Oznacza to, że dwa pojazdy wykryte przez detektor były „fantomami” - nie było ich w rzeczywistości. Spowodowało to, że błąd zliczania pojazdów wyniósł 0,2%.

4.2. Badanie dokładności pomiaru prędkości

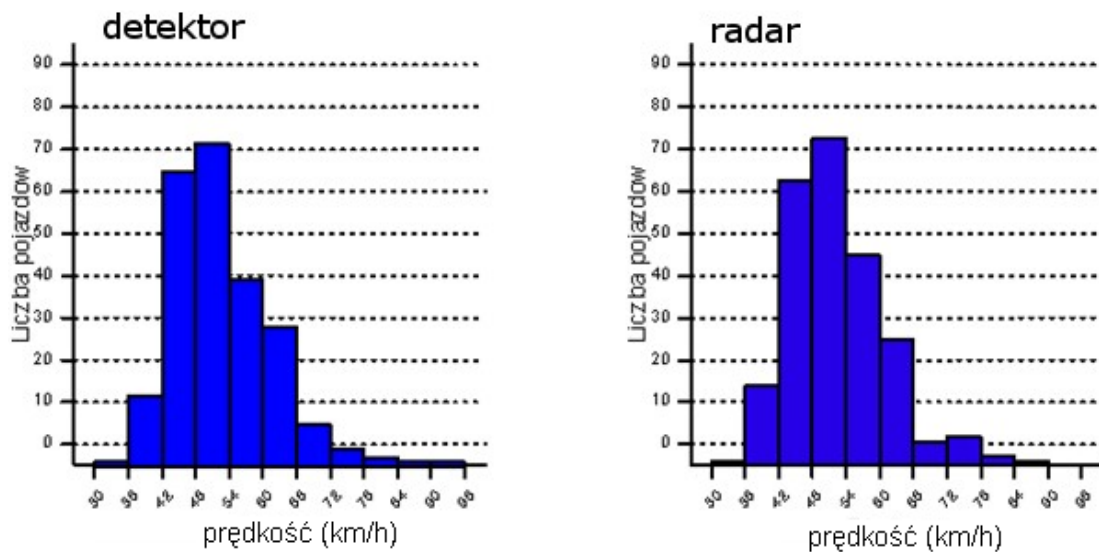
Prędkości zmierzone przez detektor TT 298 porównano z wynikami uzyskanymi referencyjnego miernika Rapid 1. Deklarowany błąd radaru wynosi ± 3 km/h dla prędkości do 100 km/h i $\pm 3\%$ dla większych. Dokładność pomiaru prędkości detektorem TT 298 obarczone są niepewnością, wynikającą z wielkości błędu urządzenia referencyjnego.

Część wyników pomiarów prędkości odrzucono z następujących przyczyn:

- ✓ prędkość pojazdu została zmierzona radarem, ale detektor pomimo wykrycia pojazdu nie określił jego typu i w konsekwencji nie zarejestrował prędkości.
- ✓ różnica w wynikach pomiaru prędkości była na tyle duża, że istniała wątpliwość czy pomiary dotyczą tego samego pojazdu.

W trakcie pomiarów została zmierzona prędkość 249 pojazdów. Po odrzuceniu wyników wątpliwych do dalszych analiz uwzględnionych zostało 235 pomiarów.

Ze względu na to, że radar referencyjny skierowany był pod kątem, wyniki pomiarów zostały skorygowane o wartość cosinus kąta przesunięcia wyrażonego jako $\frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}$ (gdzie $a=20$, $b = 4,5$ zgodnie z rys. 2).



Rys. 3. Rozkłady prędkości pojazdów określone przez detektor TT 298 i radar referencyjny [7]

Różnica między średnimi wartościami prędkości zmierzonych przy użyciu detektora oraz radaru wynosi zaledwie 0,81 km/h (średnia prędkość pojazdów zmierzona referencyjnym miernikiem wyniosła 52,87, podczas gdy dla detektora ta wartość wyniosła 52,06). Oznacza to, że średnia prędkość pojazdów objętych pomiarem była zaniżona przez detektor o 1,5% względem referencyjnego miernika prędkości. Wartość odchylenia standardowego jest również zbliżona (dla wartości pomiarów wykonanych przenośnym radarem odchylenie standardowe wyniosło 9,15, w przypadku detektora: 8,77). Nawet bez uwzględniania błędu detekcji radaru można stwierdzić, że wartości prędkości uzyskanych przez detektor TT 298 są bardzo zbliżone do pomiarów wykonanych przez radar.

5. WNIOSKI

Badania zintegrowanego detektora pojazdów Asim TT 298 umożliwiły wieloaspektową ocenę urządzenia. Celem, pomiarów było określenie dokładności pozyskiwanych danych. Wyniki pomiaru prędkości wykonywanych przez detektor były zgodny ze wskazaniami mikrofalowego radaru referencyjnego. Błąd zliczania pojazdów wyniósł zaledwie 0,2%. Rozpoznawanie pojazdów wg typów również było dokładne; szczególnie w przypadku pojazdów, których próba była znaczna. Skuteczność klasyfikacji samochodów osobowych wyniosła 99%, samochodów dostawczych 95%.

Ocena detektora pozwala sformułować wniosek, że jest to urządzenie pozwalające uzyskać dokładne wyniki, przy stosunkowo prostej instalacji i obsłudze. Przygotowany zestaw pomiarowy umożliwia „mobilne” wykonanie pomiarów. Istotnym ograniczeniem są wymagania lokalizacji urządzenia w osi, nad pasem ruchu pojazdów.

Bibliografia

1. Bonneson J., Middleton D., Zimmerman K., Charara H., Abbas M., *Intelligent Detection-Control System for Rural Signalized Intersections*, Research Report FHWA/TX-02/4022-2, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, August 2008.
2. Bush Fritz, *Combination Detector TT 292 Test – Final Report*, Technische Universitat Munchen, 2004.
3. Gibson D., Mills M., Klein L.A., *A New look at sensors*, “Public Roads”, November/December 2007.
4. *Installation Manual Tri-Tech TT 293, TT 295, TT 298 Combination Detectors for Traffic Data Acquisition, Asim*, 2007, <http://www.xtralis.com>.
5. *ITS Benefits and Unit Costs Database*, United States Department of Transportation's Joint Program Office for Intelligent Transportation Systems, [http://www.benefitcost.its.dot.gov/its/benecost.nsf/images/Reports/\\$Files/costelements.xls](http://www.benefitcost.its.dot.gov/its/benecost.nsf/images/Reports/$Files/costelements.xls).
6. Klein L., Mills M., Gibson D., *Traffic Detector Handbook: Third Edition—Volume I, Volume II* Publication No. FHWA-HRT-06-108, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, October 2006.
7. Klos A.: Stanowisko do badań parametrów ruchu drogowego z wykorzystaniem zintegrowanego detektora pojazdów. Praca dyplomowa magisterska. Kierownik pracy dr. inż. J. Suda. Wydział Transportu, Politechnika Warszawska. Warszawa 2009.
8. Mimbela L., Klein L.: *A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems*, The Vehicle Detector Clearinghouse, August 2007.
9. Suda J.: Pomiary w ruchu drogowym. Materiały wykładowe. Wydział Transportu PW. Warszawa 2006.

COMBINATION VEHICLE DETECTOR EVALUATION

Abstract: This article presents testing methodology of combination traffic detector and its results. Detector that was evaluated is a new approach in traffic detection. It combines multiple technologies into one unit Detector utilizes three technologies: Doppler radar, ultrasonic and passive infrared. Evaluation goal was to determine detector accuracy of data acquisition. Examined data were volume, speed and classification. Usability, ease of installation, storing and processing data were also analyzed.

Keywords: ITS, traffic detection, detection device, vehicle detector.