

Piotr BURNOS, Janusz GAJDA, Piotr PIWOWAR, Ryszard SROKA, Marek STENCEL, Tadeusz ŻEGLIEN

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA METROLOGII

WieloczuJNIKOWY system ważenia pojazdów samochodowych w ruchu

Mgr inż. Piotr BURNOS

Absolwent Wydziału Elektrycznego Akademii Górniczo Hutniczej. Studia na kierunku Elektrotechnika, specjalność Automatyka i Metrologia, ukończył w 2005 roku. Jest zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Metrologii AGH. Zainteresowania naukowe dotyczą statystycznych metod analizy danych, identyfikacji obiektów oraz pomiarów parametrów ruchu drogowego.



e-mail: burnos@agh.edu.pl

Dr inż. Ryszard SROKA

Jest adiunktem w Katedrze Metrologii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W swoich pracach zajmuje się pomiarami wielkości nieelektrycznych, pomiarami w ruchu drogowym, fuzją danych oraz szeroko pojętym modelowaniem systemów pomiarowych. Jest autorem około 80 prac naukowych, w tym jednej książki, rozdziału w książce i dwóch skryptów.



e-mail: rysieks@uci.agh.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Janusz GAJDA

Ur. 21 maja 1954 roku w Jarosławiu, 1978r. – mgr inż., 1985 r. - stopień dr n.t., 1992r. - stopień dr hab. (wszystkie stopnie na Wydziale EAIiE AGH, elektrotechnika – metrologia elektryczna), 2001r. - tytuł profesora n.t. Tematyka badawcza: badania symulacyjne w metrologii, identyfikacja obiektów, statystyczna analiza danych pomiarowych, pomiary biomedyczne, pomiary parametrów ruchu drogowego. Autor 121 publikacji, 1 patentu, wypromował 3 doktorów. Członek Komitetu Metrologii i AN PAN, redaktor działu metrologia w PAK.



e-mail: jgajda@agh.edu.pl

Dr inż. Marek STENCEL

Urodzony 3.04.1965r. Studia na Wydziale EAIiE, AGH w Krakowie w 1990r. W 1998 r. uzyskał stopień doktora na tym samym wydziale. Autor ponad 50 prac z zakresu miernictwa i przetwarzania sygnałów. Zajmuje się konstruowaniem przyrządów pomiarowych wykorzystujących technikę mikrokontrolerów oraz DSP. Głównym obszarem zainteresowań zawodowych są pomiary parametrów ruchu drogowego. Pracuje jako adiunkt w Katedrze Metrologii AGH w Krakowie.



e-mail: masten@uci.agh.edu.pl

Dr inż. Piotr PIWOWAR

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektrotechniki AGH w 1999 r., uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna w 2007 r. Obecnie zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Metrologii AGH. Zajmuje się modelowaniem i konstrukcją systemów pomiarowych w biomedycynie, oraz pomiarami parametrów pojazdów w ruchu.



e-mail: ppiwowar@agh.edu.pl

Dr inż. Tadeusz ŻEGLIEN

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH w Krakowie. Jest adiunktem w Katedrze Metrologii tego samego wydziału. Autor ponad 50 prac naukowych dotyczących zagadnień projektowania systemów pomiarowych, modelowania i badań symulacyjnych systemów pomiarowych, analizy i przetwarzania sygnałów, pomiarów biomedycznych, pomiarów parametrów wylądowań elektrostatycznych i pomiarów parametrów ruchu drogowego.



e-mail: tetzet@uci.agh.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wieloczuJNIKOWY system ważenia pojazdów samochodowych poruszających się z prędkościami drogowymi - MS-WIM (Multi Sensor – Weigh – in – Motion). System ten został zbudowany w latach 2003 – 2006 w ramach projektu badawczego finansowanego przez MNiSzW. Celem ważenia pojazdu jest wyznaczenie zarówno estymaty nacisku statycznego wywieranego przez poszczególne osie pojazdu na podłoże, jak również całkowitej masy pojazdu. Podstawą estymacji są wyniki pomiaru dynamicznych uderzeń wywieranych przez koła pojazdu i zarejestrowanych podczas jego przejazdu przez stanowisko WIM. Zbudowany system MS-WIM pozwala na estymację masy całkowitej pojazdu z niepewnością ocenianą odchyleniem standardowym wyniku ważenia, wynoszącym około 2%, w zakresie prędkości ważonych pojazdów 30 – 80 km/h.

Słowa kluczowe: ważenie pojazdów samochodowych, ważenie w ruchu, systemy WIM

Multi-Sensor Weigh – In - Motion System

Abstract

The paper deals with multi-sensors high speed Weigh – In - Motion System (MS-WIM). This system was designed in the period of 3 years from 2003 to 2006 and was financed by Polish Ministry of Science and High Education. The estimation of the vehicle's static axle load, as well as its total mass is the main aim of the weighing process. This estimation bases on the measurement results of the dynamic load exerted by successive axles on the road. The designed system allows estimating the vehicle total mass with the uncertainty determined by a relative standard deviation equal to 2%, in the vehicle speed range from 30km/h to 80km/h.

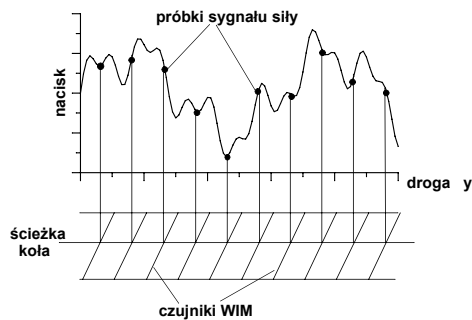
Keywords: weighing of the vehicles, weighing in the motion, WIM systems

1. Wstęp

Ze względu na ochronę infrastruktury drogowej oraz bezpieczeństwo ruchu istnieje konieczność rozwoju skutecznych i efektywnych systemów kontroli masy pojazdów oraz nacisków statycznych ich osi na nawierzchnię drogi. Takie cechy posiadają systemy ważenia pojazdów samochodowych w ruchu określane akronimem WIM. Systemy te stanowią alternatywę dla nieefektywnego ważenia statycznego lub wolnoprzejazdowego. Podstawową wadą systemów WIM jest jednak ograniczona dokładność ważenia. Przyczyny tego ograniczenia mają różnorodny charakter. W pierwszej kolejności należy do nich zaliczyć:

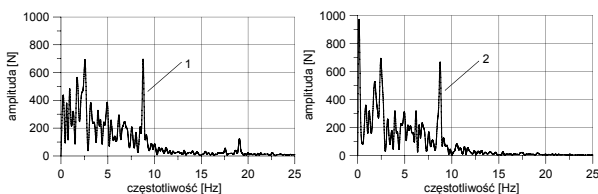
- pionowe wahanía ważonego pojazdu podczas przejazdu przez stanowisko pomiarowe,
- wpływ warunków klimatycznych, a zwłaszcza temperatury na czułość układu pomiarowego,
- zmiany czułości wzdłuż czujników nacisku, które stanowią podstawowy element systemu WIM.

Nacisk wywierany przez koła jadącego pojazdu na podłoże nie jest stały. Wokół składowej stałej wywołanej grawitacją obserwuje się występowanie składowej zmiennej wywołanej pionowymi wahaniami ważonego pojazdu oraz podskakiwaniem kół. Amplituda oraz widmo częstotliwościowe składowej zmiennej zależą od właściwości konstrukcyjnych pojazdu, masy, prędkości jazdy oraz nierówności nawierzchni. Siła nacisku jest próbkowana w chwilach czasowych, w których jej położenie odpowiada lokalizacji kolejnego czujnika nacisku (rysunek 1). Jeżeli czujniki są rozłożone równomiernie, a prędkość pojazdu jest stała, to sygnał siły nacisku jest również próbkowany równomiernie. Częstotliwość próbkowania zależy bezpośrednio od wzajemnych odległości pomiędzy czujnikami oraz od prędkości pojazdu. Liczba próbek sygnału siły nacisku, zebranych w trakcie przejazdu przez stanowisko WIM odpowiada liczbie czujników nacisku. Równoliczne zbiory próbek sił nacisku są zbierane dla każdej osi ważonego pojazdu.



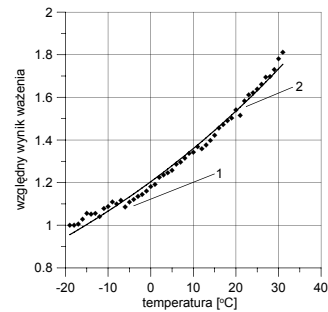
Rys. 1. Próbkowanie siły nacisku na stanowisku MS-WIM.
Fig. 1. Sampling of the load force on the MS-WIM site.

Zebrane w ten sposób próbki siły nacisku są podstawą estymacji nacisku statycznego każdej z osi ważonego pojazdu, co z kolei pozwala wyznaczyć jego masę całkowitą. Widmo częstotliwościowe składowej dynamicznej sygnału siły nacisku jest ograniczone do częstotliwości 10 – 12 Hz (rysunek 2).



Rys. 2. Amplitudowe widma częstotliwościowe sygnałów nacisku kół pojazdu przykładowego na podłożu. 1 – koło lewe, 2 – koło prawe.
Fig. 2. Amplitude frequency spectrum of the load signals of exemplary vehicle wheels. 1- left wheel, 2 – right wheel.

Czujniki piezoelektryczne są jednym z typów czujników nacisku wykorzystywanych w systemach WIM. Czujniki te mają postać wąskiej taśmy (16 mm) o długości 4.0 m i są montowane pod nawierzchnią jezdni, prostopadle do kierunku jazdy ważonego pojazdu. W efekcie bitumiczna nawierzchnia jezdni przenosi siłę nacisku z koła pojazdu na czujnik. Jest to zjawisko niekorzystne, ponieważ zmiana mechanicznych właściwości nawierzchni w funkcji temperatury powoduje w konsekwencji zmianę czułości całego stanowiska. Jest to druga z wymienionych na wstępie podstawowych przyczyn ograniczających dokładność ważenia pojazdów samochodowych systemami WIM. Eksperymentalnie wyznaczony wpływ temperatury na wynik ważenia w przykładowym systemie wyposażonym w czujniki piezoelektryczne przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zmiana wyników ważenia w funkcji temperatury asfaltu. 1 – wyniki pomiarów, 2 – model (1).
Fig. 3. Weighing result vs. asphalt temperature. 1 – measurement results, 2 – model (1).

Model, który dobrze opisuje ten wpływ ma postać [1, 2, 3, 4]:

$$C_m(T_a) = k_1 \cdot 10^{w_1(T_a - T_0)} \quad (1)$$

gdzie:

T_a - temperatura asfaltu,

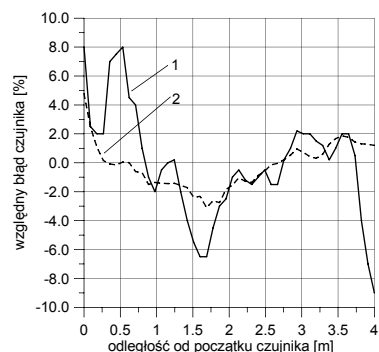
$k_1 = 2.0805$ – współczynnik wzmocnienia,

$w_1 = -0.0053$ – współczynnik nachylenia krzywej,

$T_0 = 45$ – temperatura odniesienia wyrażona w [°C].

Trzecią przyczyną ograniczającą dokładność ważenia w systemach MS-WIM jest zmienność czułości wzdłuż czujnika piezoelektrycznego. Jak wynika z charakterystyki przedstawionej na rys. 4 czułość czujnika zmienia się w przedziale $\pm 7.5\%$. Tylko z tego powodu wynik ważenia tego samego pojazdu przejeżdżającego po różnych ścieżkach przez stanowisko ważące wyposażone w jeden czujnik, może się zmieniać właśnie w takich granicach.

Ograniczenie szkodliwego wpływu ww. zjawisk można osiągnąć w systemach wieloczujnikowych MS-WIM.



Rys. 4. Błędy przykładowego czujnika piezoelektrycznego (1) oraz średni błąd 16 czujników (2).
Fig. 4. Internal errors of the exemplary piezoelectric load sensor (1) and mean error of the set of 16 sensors (2).

2. Opis systemu MS-WIM

Idea systemów wieloczujnikowych (MS-WIM) jest stosunkowo prosta: zwiększenie liczby czujników nacisku (tym samym zwiększenie liczby próbek siły nacisku) pozwala na ograniczenie wpływu składowej dynamicznej nacisku na niepewność estymacji składowej statycznej. Równocześnie, nawet prosty algorytm uśredniania wielu próbek siły nacisku pochodzących z różnych czujników WIM pozwala również ograniczyć wpływ zmian czułości wzdłuż czujnika siły nacisku.

Jeżeli czujnik nacisku jest umieszczony w punkcie y wybranym wzdłuż drogi jazdy ważonego pojazdu, to uzyskany wynik pomiaru nacisku osi oznaczony przez W_y jest opisany zależnością (2).

$$W_y(t) = P(t) + e_y = P_0 + F(t) + e_y \quad (2)$$

gdzie:

$P(t) = P_y = P_0 + F(t)$ - siła nacisku osi pojazdu na podłoże, która jest funkcją czasu, a dla określonego położenia czujnika WIM określonego przez współrzędną y jest równa P_y ,

P_0 - statyczny nacisk osi,

$F(t)$ - składowa dynamiczna nacisku,

e_y - błąd wywołany właściwościami czujnika (wewnętrzny).

Z zależności (2) wynika, że możliwe są dwa sposoby definiowania błędów systemu WIM:

- e_y jest wewnętrznym błędem czujnika określanym przez dostawcę (patrz rysunek 4),
- $W_y(t) - P_0 = F(t) + e_y$ jest błędem w odniesieniu do wartości statycznej, określanym przez użytkownika.

Składowa zmienna $F(t)$ zależy od wielu czynników powiązanych z samym pojazdem lub ze stanem nawierzchni, a ponadto z fazą sygnału $P(t)$, która powoduje, że w pewnych lokalizacjach czujnika $P(t) = P_y = P_0$ a dla innych iloraz $F(t)/P_0$ może osiągać wartość 20% na gładkich nawierzchniach do 80% na nawierzchniach chropowatych.

Powyższe rozważania dotyczą błędów pojedynczego czujnika WIM. Trochę inaczej problem ten wygląda w systemach MS-WIM wyposażonych w kilka czujników. W systemie zawierającym p czujników statyczny nacisk osi jest często estymowany za pomocą zwykłej średniej:

$$W_{ms} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p W_i = P_0 + \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p F(t_i) + \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p e_i \quad (3)$$

gdzie:

W_{ms} - ocena nacisku statycznego,

W_i - nacisk mierzony i -tym czujnikiem,

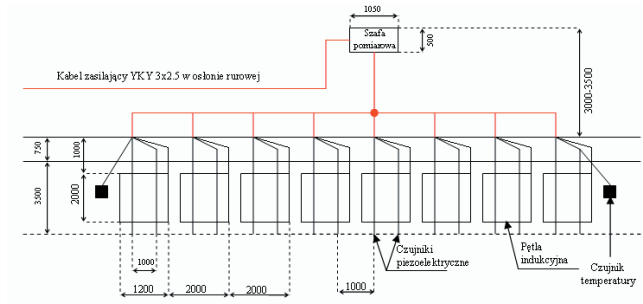
e_i - błąd i -tego czujnika,

t_i - moment najechania ważonej osi na i -ty czujnik.

Jeżeli wszystkie czujniki posiadają jednakowy wewnętrzny błąd e_i to błąd systemu MS-WIM, wynikający z tej przyczyny, pozostaje taki sam. W praktyce na ścieżce przejazdu ważonego pojazdu przez stanowisko MS-WIM błędy poszczególnych czujników zachowują się w sposób przypadkowy. Stąd uśrednianie tego błędu w zbiorze czujników pozwala zmniejszyć jego wpływ na wynik ważenia. Na rysunku 4 (krzywa 2) przedstawiona została średnia charakterystyka błędu wyznaczona dla zbioru 16 czujników piezoelektrycznych. Średni błąd wyznaczony dla takiego stanowiska MS-WIM zawiera się w granicach $\pm 3\%$.

Największa korzyść ze stosowania systemów MS-WIM polega na tym, że pozwalają one zredukować składową dynamiczną $F(t)$ poprzez odpowiednie próbkowanie sygnału $P(t)$. Projektowanie takich systemów polega na wyborze p współrzędnych y_i , które zapewniają minimalizację wpływu składowej $F(t)$ na ocenę W_{ms} .

Zbudowany system MS-WIM składa się z zamontowanego w jezdni stanowiska MS-WIM oraz układów kondycjonowania, przetwarzania i akwizycji danych pomiarowych tworzących system pomiarowy. Plan sytuacyjny stanowiska wraz z jego wymiarami przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Plan sytuacyjny stanowiska MS-WIM.

Fig. 5. Scheme of the MS-WIM site.

Stanowisko MS-WIM składa się z 8 pętlowych czujników indukcyjnych, 16 piezoelektrycznych czujników nacisku i 2 czujników temperatury. Czujniki nacisku są rozmieszczone równomiernie, w odległości 1m od siebie (wynika to z przeprowadzonych badań modelowych [5]). Każdą parę czujników nacisku obejmuje jeden indukcyjny czujnik pętlowy. Czujniki temperatury zostały zainstalowane na początku i końcu stanowiska pomiarowego (wynik pomiaru temperatury jest wykorzystywany do korekcy wyników ważenia, uwzględniającej zmianę mechanicznych właściwości nawierzchni bitumicznej).

System pomiarowy współpracujący z tym zestawem czujników składa się z ośmiu systemów podrzędnych. Każdy z nich zawiera jeden układ kondycjonowania sygnałów współpracujący z pętlowym czujnikiem indukcyjnym i czujnikiem temperatury, układ współpracujący z dwoma piezoelektrycznymi czujnikami nacisku i mikrokontroler. Wszystkie czujniki separowane są od systemu pomiarowego i wzajemnie od siebie.

Nadrzędny system zbierania danych z systemu MS-WIM składa się z komputera klasy PC, karty PCI RS232/8 firmy National Instrument zawierającej osiem portów RS232 oraz z oprogramowania w postaci programu MS-WIM v.1.0, które steruje odbieraniem danych pomiarowych oraz ich przetwarzaniem i zapisywaniem w pamięci.

3. Ocena błędów i niepewności ważenia pojazdów

System MS-WIM musi być poddawany cyklicznej kalibracji, której celem jest eliminacja błędów ważenia spowodowanych zmianą stałej przetwarzania układu pomiarowego w funkcji czasu. Zmiana czułości układu pomiarowego jest w pierwszej kolejności spowodowana „starzeniem” się czujników piezoelektrycznych, którego szybkość zależy przede wszystkim od temperatury pracy czujników oraz od trwałości nawierzchni, w której te czujniki zostały zamontowane.

Wymagana częstotliwość kalibracji systemu WIM zależy od stopnia jego niestacjonarności. W celu oceny tej cechy skonstruowanego systemu przeprowadzono rejestrację wyników ważenia pierwszej osi zestawów zawierających dwuosiowy ciągnik siodłowy oraz trzyosiową naczepę, które przyjęto za pojazdy odniesienia. Ten wybór jest uzasadniony względnie małą zmiennością nacisku pierwszej osi w zależności od masy całkowitej pojazdu. Wartość średnia nacisku tej osi wynosi 61677 [N], a jego względne odchylenie standardowe jest równe 7.3% (dane uzyska-

ne na podstawie wyników ważenia na wolno-przejazdowej wadze administracyjnej). Pomiary takie przeprowadzono dla wybranego podsystemu zawierającego dwa czujniki nacisku, w odstępach 75 dni i w różnych temperaturach nawierzchni (45 – 50°C - pierwsza seria pomiarów, 20°C – druga seria). Dla pierwszej serii wartość średnia w zbiorze wyników ważenia pierwszej osi wybranego pojazdu odniesienia wynosi 4 277.6 dla pierwszego czujnika oraz 3 717.4 dla czujnika drugiego. Odchylenia standardowe wynoszą odpowiednio 760 i 801. Wszystkie wartości są podane bez wymiarów fizycznych, gdyż dotyczą systemu przed kalibracją.

W drugiej serii średnia z próby zebranych wyników pomiarowych wynosi 4 504.6 dla pierwszego czujnika oraz 3519 dla czujnika drugiego. Ich odchylenia standardowe są natomiast równe 653 i 977. W przedziale czasu (a także temperatury), jaki dzielił obydwie eksperymenty nie zauważono istotnych zmian właściwości systemu pomiarowego. Różnice pomiędzy wartościami średnimi wyników pomiaru nacisku uzyskanych w obu seriach dla każdego z czujników wynoszą około 200, co stanowi około 0.25 ich odchylenia standardowych.

Niepewność ważenia oceniono na podstawie wielokrotnego ważenia pojazdów samochodowych o różnych (znanych) masach całkowitych, poruszających się z różnymi prędkościami. W zależności od stosowanego algorytmu estymacji masy całkowitej ważonego pojazdu niepewność wyników ważenia mierzona względny odchyleniem standardowym wyniosła 2.28% dla algorytmu polegającego na zwykłym uśrednianiu wyników ważenia z poszczególnych czujników nacisku, 2.06% dla algorytmu największej wiarygodności oraz 2.21% dla połączonych algorytmów największej wiarygodności oraz nieliniowego algorytmu najmniejszych kwadratów [6, 7, 8].

Bogatszą informację nt. statystycznych właściwości błędów ważenia w porównaniu z odchyleniem standardowym zawiera charakterystyka (4). Ilustruje ona rozkład prawdopodobieństwa błędów estymacji nacisku statycznego, a dokładniej mówiąc określa prawdopodobieństwo wystąpienia błędu o wartości większej niż δp . Jest ona nazywana charakterystyką niezawodności. Podstawą wyznaczenia charakterystyki (4) są wyniki wielokrotnego ważenia różnorodnych pojazdów odniesienia tj. pojazdów o znanej masie całkowitej i naciskach statycznych osi, różniących się parametrami mechanicznymi i poruszających się z różnymi prędkościami.

$$\Pr(\delta p) = 1 - F(\delta p) \quad (4)$$

gdzie:

$\delta p = \left| \frac{\bar{P} - P_0}{P_0} \right|$ - moduł względnego błędu estymacji składowej

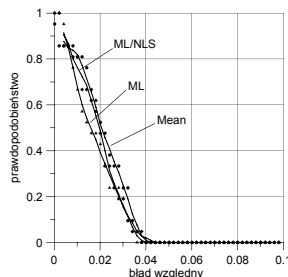
statycznej P_0 ,

\bar{P} - ocena składowej statycznej,

$F(\delta p)$ - dystrybuanta błędu δp wyznaczona na podstawie

wyników estymacji uzyskanych dla strumienia pojazdów,

$\Pr[\]$ - prawdopodobieństwo.



Rys.6. Charakterystyka niezawodności dla danych z rzeczywistego stanowiska MS-WIM i dla różnych algorytmów estymacji nacisku statycznego: Mean – uśrednianie, ML – algorytm największej wiarygodności, ML/NLS – połączenie algorytmu największej wiarygodności i nieliniowego algorytmu najmniejszych kwadratów.

Fig. 6. Reliability characteristic of the WIM system. These characteristics correspond to different algorithms of static load estimation: mean value of the measurement results of separate sensors (Mean), maximum likelihood estimator (ML), joined maximum likelihood and nonlinear least square estimators (ML/NLS).

Na rysunku 6 przedstawiono charakterystyki niezawodności wyznaczone na podstawie zależności (4) dla różnych estymatorów masy całkowitej. Pozwalają one na łatwą ocenę niepewności zbudowanego systemu MS-WIM. Z charakterystyk tych wynika, że wartość błędu maksymalnego jest rzędu 4% (co oznacza, że żaden z pojazdów nie został zważony z błędem większym niż podana wartość).

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono 16-to czujnikowy system ważenia pojazdów samochodowych w ruchu. W jego konstrukcji zastosowano taśmowe czujniki piezoelektryczne, które posiadają gorsze właściwości metrologiczne w porównaniu z czujnikami kwarcowymi, ale za to są około czterokrotnie tańsze. Przyjęcie takiego rozwiązania pozwoliło zrealizować projekt pomimo znacznego ograniczenia jego budżetu i potwierdzić postawioną na wstępie hipotezę, że tego typu systemy ważące ze względu na osiągnięte dokładności ważenia mogą być stosowane jako systemy administracyjne. Autorzy zdają sobie jednak sprawę, że zastosowanie czujników kwarcowych pozwoliłoby uniknąć znacznych trudności, na jakie napotkali w trakcie budowy tego systemu, a które były spowodowane przede wszystkim wpływem temperatury na stałą przetwarzania czujników. Pomyślnie rozwiązany został problem akwizycji danych pomiarowych i ich przetwarzania oraz archiwizacji, wykonywanych w czasie rzeczywistym, w warunkach istniejącego natężenia ruchu.

Metrologiczne parametry systemu wykazują dobrą długoterminową stabilność, a maksymalny błąd ważenia określony dla populacji kilkudziesięciu wstępnie zważonych pojazdów nie przekracza 4% przy prędkości jazdy ważonych pojazdów zawartej w przedziale 30 – 80 km/h.

Zbudowany system jest pierwszym systemem MS-WIM zbudowanym i pracującym w Polsce oraz jednym z kilku systemów zbudowanych w Europie.

Publikacja została sfinansowana przez Ministerstwo NiSzW w ramach projektu rozwojowego R01 035 01.

5. Literatura

- [1]. Gawęł I., Kalabińska M., Piłat J., „Asfalty drogowe”, Wydaw. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2001.
- [2]. Scheuter F.; “Evaluation of Factors Affecting WIM Systems Accuracy”, Pre-proceedings of 2-th European Conference of Weigh in Motion of Road Vehicles, Lisbon, 1998r.
- [3]. Lukanen E., Stubstad R., Briggs R., “Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement”, Final Report of LTPP, Federal Highway Administration 06/2000.
- [4]. Burnos P., „Analiza niestacjonarności systemów WIM”, PAK 10bis/2006, Materiały XVI Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Krynica, wrzesień 2006, str. 72-76.
- [5]. Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T.; „Modelowanie i badania symulacyjne wieloczujnikowego systemu ważenia pojazdów samochodowych w ruchu”, PAK 3/2007, str. 78-86.
- [6]. Cebon D., Winkler CB.; „Multiple-Sensor WIM: Theory and experiments”, Transportation Research Record, TRB, 1311, 1991, pp. 70 -78
- [7]. Cebon D.; „Design of multiple-sensor weigh-in-motion systems”, Journal of Automobile Engineering, Proc, I.Mech.E., 204, 1990, pp. 133 – 144
- [8]. Cebon D.; “Weigh-in-motion of Road Vehicles for Europe (WAVE) – Report of Work Package 1.1 – Multiple sensor WIM”, May 2001.