

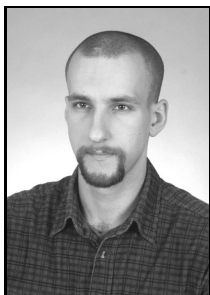
**Piotr BURNOS**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE, KATEDRA METROLOGII,  
Al. Mickiewicza 30, pawilon B-1, 30-059 Kraków

**Identyfikacja niestacjonarności systemu WIM**

Dr 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 adiunkta w Katedrze Metrologii AGH. Zainteresowania naukowe dotyczą statystycznych metod analizy danych, identyfikacji obiektów oraz pomiarów parametrów ruchu drogowego.



e-mail: burnos@agh.edu.pl

**Streszczenie**

W pracy opisano metodę identyfikacji niestacjonarności systemów ważących pojazdy samochodowe w ruchu (Weigh in Motion). Rozważono zmiany temperatury otoczenia oraz wilgotności jako główne przyczyny tej niestacjonarności. Przedstawiono ideę metody identyfikacji, wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych, które wykonano w oparciu o rejestrację z systemu ważącego zainstalowanego na drodze nr 81 w miejscowości Gardawice.

**Słowa kluczowe:** ważenie w ruchu, systemy WIM, identyfikacja, niestacjonarność.

**Identification of non-stationary WIM system****Abstract**

With regard to protection of the road infrastructure and traffic safety, there is a need for intensive development of Weigh in Motion (WIM) systems. These systems are the alternative for ineffective static or low – speed weighing. However, a major drawback of Weigh in Motion (WIM) systems is high uncertainty of weighing results. Reasons for this fact are various, however one of the most important of them is nonstationarity of the system recognised as changes of its parameters in time. This phenomenon gains special significance in case of systems equipped with piezoelectric polymer sensors installed in the road pavement. The work contains analysis of the WIM system nonstationarity and describes the method for identification of this nonstationarity. Understanding of the mechanisms of this phenomenon as well as specification of its parametric model is vital from the aspect of prevention against the effects of nonstationarity. The constructed model can be used as a basis for simulation test of WIM systems, in particular sensitivity tests of different algorithms of acquisition and processing of data in nonstationary systems. The gained knowledge will also enable improvement of algorithms limiting the influence of system nonstationarity on weighing results, i.e. the autocalibration and temperature correction algorithm.

**Keywords:** weigh in motion, non – stationary WIM systems, identification.

**1. Wstęp**

Systemy ważące pojazdy samochodowe w ruchu z piezoelektrycznymi czujnikami polimerowymi są najbardziej rozpowszechnione wśród systemów WIM (Weigh in Motion) [1]. Polimer znajdujący tu szczególne zastosowanie to odkryty pod koniec lat 60-tych materiał o nazwie polifluorek winylidenu (PVDF). Duża popularność takich czujników wynika z ich niskiej ceny oraz łatwego montażu. Czujniki takie wykonane są w postaci wąskich taśm o długości 4 metrów, które montowane są w nawierzchni lub pod nawierzchnią jezdni prostopadle do kierunku ruchu, w taki sposób, że poszczególne osie ważonego pojazdu przetaczają się kolejno przez te czujniki. Koło pojazdu nie ma bezpośredniego kontaktu z czujnikami, a sygnał pomiarowy przenoszony jest na czujnik przez nawierzchnię jezdni. To powoduje, że wyniki ważenia są bardzo wrażliwe na zmiany właściwości samej nawierzchni.

Zjawisko to (jak również inne czynniki zakłócające) wywołuje niestacjonarność systemu i poza pionowymi wahaniami pojazdu jest główną przyczyną dużej niedokładności uzyskiwanych wyników ważenia.

**2. Analiza danych pomiarowych**

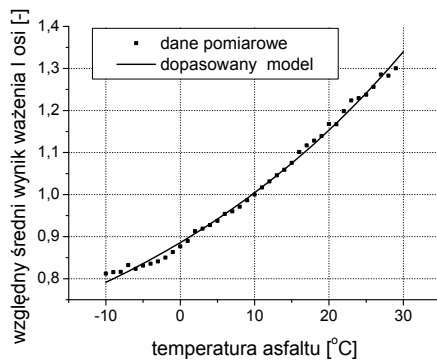
System pomiarowy jest niestacjonarny wtedy, gdy jego parametry zmieniają się w czasie. Miarą tej niestacjonarności może być zakres zmian wyników pomiarowych pod warunkiem, że system za każdym razem pobudzany jest takim samym wymuszeniem, najlepiej wartością wzorcową wielkości mierzonej. W przypadku systemów WIM do tego celu można użyć pojazdu wstępnie zważonego lub oprzyrządowanego. Wykorzystanie takich pojazdów podczas długoterminowych (kilkanaście dni) obserwacji systemu nie jest jednak możliwe ze względu na bardzo wysokie koszty oraz trudności z zapewnieniem ciągłości ruchu pojazdów. Alternatywą jest wykorzystanie tak zwanych pojazdów odniesienia tj. pięcioosiowych samochodów ciężarowych zawierających dwuosiowy ciągnik siodłowy oraz trójosiową naczepę [2]. Pojazdy te są normalnymi uczestnikami ruchu drogowego, a wyróżnia je rozmieszczenie trzech osi naczepy we wzajemnych odległościach równych 1310 mm, co znacznie ułatwia ich identyfikację, oraz mała względna losowa zmienność nacisku pierwszej osi (10%), której wartość średnia jest równa  $\mu_0=61677$  [N]. Oznacza to, że nacisk tej osi jest stabilny, w niewielkim stopniu zależy od przewożonego ładunku czyli masy pojazdu i może służyć za wielkość odniesienia podczas oceny stacjonarności systemu.

Analizując wyniki pochodzące z systemu WIM zainstalowanego w miejscowości Gardawice [3], stwierdzono zmiany wartości parametrów statystycznych wielkości odniesienia w kolejnych okresach 24 – godzinnych. Na przestrzeni 20 dni zaobserwowano ponad 12% zmianę wartości średniej oraz 15% zmianę odchylenia standardowego wyników ważenia. Przyczyną tego zjawiska nie może być stopniowa zmiana nacisku pierwszej osi pojazdów odniesienia, ze względu na brak logicznego uzasadnienia takiej sytuacji. Obserwowana niestacjonarność może być wywołana zmianą własności samych czujników, nawierzchni, w której są one zamontowane lub parametrów charakteryzujących system akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych.

W systemach z czujnikami polimerowymi przenoszenie sygnału pomiarowego przez nawierzchnię jezdni powoduje, że wyniki ważenia są bardzo wrażliwe na zmiany jej parametrów. Asfalt jest lepizszcem, którego właściwości fizyko-mechaniczne są funkcją temperatury i czasu obciążenia. Wraz ze zmianą tych wielkości zmienia się przede wszystkim konsystencja materiału bitumicznego charakteryzowana przez lepkość i sprężystość [4]. Zjawisko to zobrazowano na rysunku 1, gdzie pokazano wpływ zmiany temperatury asfaltu na wyniki ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia (charakterystyka wyznaczona na podstawie rejestracji wykonanych w latach 2006 - 2007).

Pozostałe czynniki mogące wpływać niekorzystnie na dokładność ważenia są związane z analogowym układem kondycjonowania sygnału z czujników nacisku. Pomimo zastosowania wysokiej jakości elementów elektronicznych, nie można wykluczyć wrażliwości układu na wahania temperatury wewnątrz szafy pomiarowej. Dodatkowo, ze względu na specyfikę budowy systemu nie można również pominąć niekorzystnego wpływu zmian wilgotności powietrza na zmianę rezystancji wejściowej układu. Na podstawie powyższych przesłanek można stwierdzić, iż istnieją czynniki zewnętrzne takie jak temperatura asfaltu, temperatura

aparatury pomiarowej oraz wilgotność powietrza, które mogą mieć wpływ na otrzymywane wyniki ważenia.

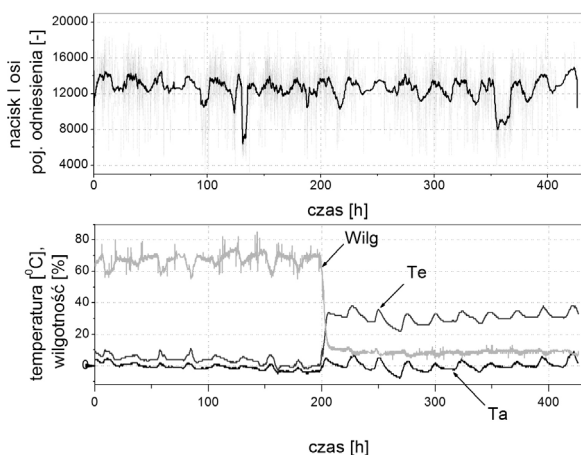


Rys. 1. Zmiana wyników ważenia w funkcji temperatury asfaltu  
Fig. 1. Variations of weighing results vs. asphalt temperature

Na rysunku 2 przedstawiono zmienność nieskalibrowanego wyniku ważenia nacisku I-szej osi pojazdów odniesienia oraz zarejestrowane przebiegi temperatury asfaltu  $T_a$ , wilgotności powietrza  $W_g$  i temperatury aparatury pomiarowej  $T_e$ . Aby na tle losowej zmienności wyników ważenia lepiej wyeksponować trend związany ze zmianą parametrów systemu WIM, dane te poddano wygładzaniu. Zastosowano metodę średniej ruchomej wg zależności:

$$y_s(i) = \frac{1}{2 \cdot N_s + 1} \cdot (y(i + N_s) + y(i + N_s - 1) + \dots + y(i - N_s)) \quad (1)$$

gdzie:  $y_s(i)$  jest  $i$ -tą wygładzona próbka, a  $N_s$  jest liczbą sąsiednich, uśrednianych próbek wektora  $y$ . Dzięki temu zabiegowi w wynikach ważenia wyraźnie widać okresową (24h) zmienność, wywołaną niestacjonarnością systemu. Aby określić, który czynnik atmosferyczny ma decydujący wpływ na właściwości systemu, w dwusetnej godzinie pracy aparatura pomiarowa została umieszczona w szczelnej obudowie. Pozwoliło to ograniczyć wpływ zmian wilgotności i temperatury powietrza na układ kondycjonowania sygnałów (rys. 2).



Rys. 2. Zmienność nacisku I-szej osi pojazdów odniesienia oraz wielkości środowiskowych  
Fig. 2. Variations of weighing results, and variation of atmospheric parameters

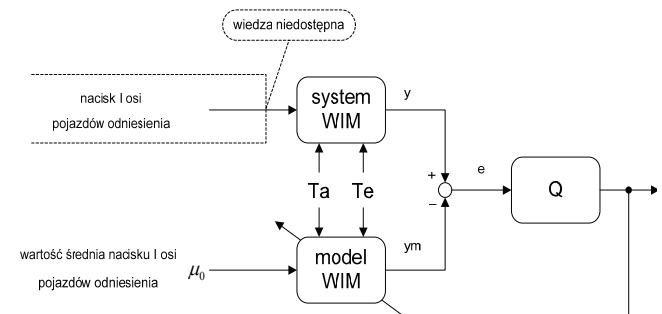
Pomimo wyraźnej zmiany warunków w dwusetnej godzinie pracy systemu, nie nastąpiła obserwowalna zmiana w wynikach ważenia. Można więc przyjąć, że zmiany temperatury aparatury pomiarowej oraz wilgotności powietrza nie mają wpływu na pracę

systemu, a głównym czynnikiem wywołującym niestacjonarność jest zmiana temperatury asfaltu.

### 3. Model systemu WIM – badania symulacyjne

Jednoznaczne określenie przyczyny niestacjonarności wymaga wyznaczenia modelu systemu WIM. Oprócz tego model taki pozwoli na lepsze zrozumienie, tego dotychczas nie opisanego zjawiska oraz umożliwi przeprowadzenie badań symulacyjnych systemów WIM.

Zaproponowana metoda identyfikacji niestacjonarności systemu WIM wykorzystuje algorytm strojonego modelu. Podstawą takiego procesu identyfikacji jest długoterminowa rejestracja wyników ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia, temperatury asfaltu oraz temperatury układu kondycjonowania sygnałów. Długoterminowość należy rozumieć jako wystarczająco długi okres czasu, w którym w zarejestrowanych wynikach ważenia uwidacznia się trend związany z niestacjonarnością systemu (porównaj rysunek 2). Oryginalność metody polega na wykorzystaniu jako wymuszenia wartości średniej nacisku I-szej osi pojazdów odniesienia  $\mu_0$  oraz sygnałów, które normalnie uznano by za zakłócające tj.: temperatury asfaltu oraz temperatury części analogowej. Dzięki temu wyznaczony model posiada stałe współczynniki, choć sam obiekt identyfikacji jest niestacjonarny.



Rys. 3. Schemat identyfikacji systemu WIM  
Fig. 3. Identification method of WIM system

Jako kryterium jakości dopasowania modelu i obiektu przyjęto funkcjonal (2).

$$Q = \sum_{i=1}^N [y(i) - y_m(i)]^2 \quad (2)$$

gdzie:  $y(i)$  –  $i$ -ty wynik ważenia z zidentyfikowanego systemu WIM,  $y_m(i)$  –  $i$ -ty wycieczony wynik ważenia z modelu wyznaczonego,  $N$  – liczba wyników ważenia.

Przed zastosowaniem nowej metody identyfikacji w praktyce należy najpierw na drodze badań symulacyjnych ocenić jej zdolność do poprawnego wyznaczenia modelu systemu WIM, przez co należy rozumieć jakościową i ilościową ocenę wpływu parametrów procesu identyfikacji na błędy wyznaczenia modelu. Podstawą badań symulacyjnych proponowanej metody identyfikacji jest model odniesienia reprezentujący obiekt identyfikacji – system WIM ze szczególnym uwzględnieniem jego niestacjonarności. Niestacjonarność osiągnięto poprzez uzależnienie wartości współczynnika kalibracji systemu od atmosferycznych czynników wpływających. Model odniesienia jest pobudzany symulowanym wymuszeniem, a jego odpowiedź stanowi symulowany wynik pomiaru, będący podstawą identyfikacji. Celem symulowanego eksperymentu jest wyznaczenie liczbowych wartości współczynników modelu wyznaczonego, które są interpretowane jako oceny współczynników przyjętego modelu odniesienia. Porównanie obliczonych współczynników modelu wyznaczonego z założonymi na wstępie wartościami współczynników modelu odniesienia jest miarą dokładności, która w probabilistycznym przypadku

identyfikacji przyjmuje formę błędów: obciążenia, średniokwadratowego i wariancji [5]. Przeprowadzenie badań symulacyjnych wymaga zbudowania modeli poszczególnych „elementów” systemu WIM:

#### Model odniesienia

$$y^j(i) = p^j(i) \cdot C(T_a^m, T_e^m) = p^j(i) \cdot \left( k \cdot 10^{w \cdot T_a^m(i)} + d \cdot T_e^m(i) \right) \quad (3)$$

gdzie:  $y^j(i)$  – symulowany wynik ważenia  $i$ -tego pojazdu, przez  $j$ -ty czujnik systemu,  $p^j(i)$  – model wymuszenia – np. nacisk I-szej osi  $i$ -tego pojazdu odniesienia,  $C(T_a^m, T_e^m)$  – model współczynnika kalibracji  $j$ -tego czujnika nacisku, którego wartość zależy od modeli  $T_a^m, T_e^m$ , wielkości  $k, w, d$  – to współczynniki modelu.

#### Model nacisku osi pojazdów odniesienia

Zakładając, że w chwili ważenia pojazd porusza się ze stałą prędkością  $V$ , a czujniki nacisku rozmieszczone są równomiernie we wzajemnych odległościach  $\Delta$  to chwilowy nacisk osi na  $j$ -ty czujnik licząc od kierunku najazdu, zgodnie z zależnością (4) wynosi:

$$p^j = P_0 + \sum_{k=1}^M P_k \cdot \sin\left(j \cdot 2\pi f_k \frac{\Delta}{V} + \varphi_k\right) \quad (4)$$

gdzie:  $j = 1, 2, 3, \dots$ ,  $P_0$  – składowa stała – nacisk statyczny osi,  $P_k, f_k, \varphi_k$  – modele parametrów  $k$ -tej składowej dynamicznej sygnału nacisku, odpowiednio: amplituda (przyjęto model liniowy), częstotliwość (zmienna losowa o rozkładzie normalnym) i faza początkowa (zmienna losowa o rozkładzie równomiernym) [6].

#### Model zmienności czynników atmosferycznych

$$T_x = A_x \cdot \sin(2\pi \cdot f_x \cdot t + \varphi_x) + a_x (t - p_x)^2 + q_x \quad (5)$$

gdzie:  $A_x, f_x, \varphi_x, a_x, p_x, q_x$  – stałe parametry modelu,  $t$  – czas [s]

#### Model algorytmu estymacji nacisku statycznego (j=2)

$$y(i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 y^j(i) \quad (6)$$

#### Model wyznaczany

Model wyznaczany pobudzany jest wartością średnią nacisku pierwszej osi pojazdów odniesienia  $\mu_0$ , gdyż informacja o chwilowej wartości nacisku osi na czujnik nie jest znana dla eksperymentatora (porównaj rysunek 2). Ponieważ model nigdy nie odzwierciedla pełnej struktury obiektu identyfikacji w modelu wyznaczanym uwzględniono jedynie wpływ temperatury asfaltu na wynik ważenia, świadomie pomijając model wpływu temperatury aparatury pomiarowej. W modelu wyznaczanym, należy jednak wziąć pod uwagę czynniki zakłócające pomiar, stąd w równaniu (7) uwzględniono wpływ nierównomierności czułości wzdłuż czujników nacisku ( $\sigma_z \cdot z$ ) oraz stałą wartość błędu obciążenia  $\rho$  wynikającą z przestrzennej powtarzalności nacisku osi [7]:

$$y_m(i) = \mu_0 \cdot C_m(T_a^m) + \mu_0 \cdot \sigma_z \cdot z(i) + \rho = \mu_0 \cdot \left( k \cdot 10^{w \cdot T_a^m(i)} \right) + \mu_0 \cdot \sigma_z \cdot z(i) + \rho \quad (7)$$

gdzie:  $\sigma_z$  – parametr określający względną (odniesioną do  $\mu_0$ ) zmienność czułości wzdłuż czujnika nacisku,  $z(i)$  – składowa losowa o rozkładzie równomiernym z przedziału  $[-0,5 \div 0,5]$ ,  $\rho$  – stała wartość – błąd obciążenia.

Symulacyjny etap badań miał na celu weryfikację przyjętego modelu odniesienia oraz ocenę dokładności zaproponowanej metody identyfikacji. Dokładność ta powinna być lepsza niż dokładność wyników pomiarowych uzyskiwanych z modelowanego urządzenia, gdyż budowanie niedokładnych modeli, dokładnych systemów pomiarowych nie znajduje uzasadnienia. Zbiór parametrów, które mogą mieć wpływ na dokładność metody identyfikacji w rozpatrywanym przypadku jest mały i ogranicza się do  $N_S$  – liczby próbek branej do uśredniania (wygładzania) wyników ważenia, oraz  $T_C$  – całkowitego czasu rejestracji wyników ważenia. Na podstawie badań symulacyjnych wyznaczono zbiór charakterystyk ilustrujących zależność  $b$  – względnego błędu obciążenia,  $\sigma$  – względnego odchylenia standardowego oraz  $\delta$  – względnego błędu średniokwadratowego od parametrów  $N_S$  i  $T_C$ . Zestawiając ze sobą wnioski płynące z przeprowadzonych symulacji przyjęto następujące wartości parametrów algorytmu identyfikacji:  $N_S=150$  i  $T_C>200h$ .

Przyjęte wartości parametrów algorytmu minimalizują powyższe błędy identyfikacji. Ich wartości oraz  $\delta_y$  – skuteczną niepewność względną wyników ważenia (8) umieszczono w tabeli 1.

$$\delta_y = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left( \frac{y_m(i) - y(i)}{y(i)} \right)^2} \quad (8)$$

Tab. 1. Błędy estymacji parametrów  $k$  i  $w$   
Tab. 1. Estimation errors of  $k$  and  $w$  parameters

|            | $k$    | $w$    |
|------------|--------|--------|
| $b$        | 0.0268 | 0.1997 |
| $\sigma$   | 0.0012 | 0.0142 |
| $\delta$   | 0.0268 | 0.2002 |
| $\delta_y$ | 0.064  |        |

Skuteczna niepewność względna, będąca miarą dopasowania modelu wyznaczanego do modelu odniesienia, wyniosła 6.4%. Jest to znacznie mniej niż niepewność wyników ważenia uzyskiwanych w systemach z dwoma czujnikami polimerowymi (15 – 20%). Dokładność identyfikacji jest więc lepsza niż dokładność wyników ważenia pochodzących z modelowanego urządzenia, a to warunkuje użyteczność metody w praktyce.

## 4. Badania eksperymentalne

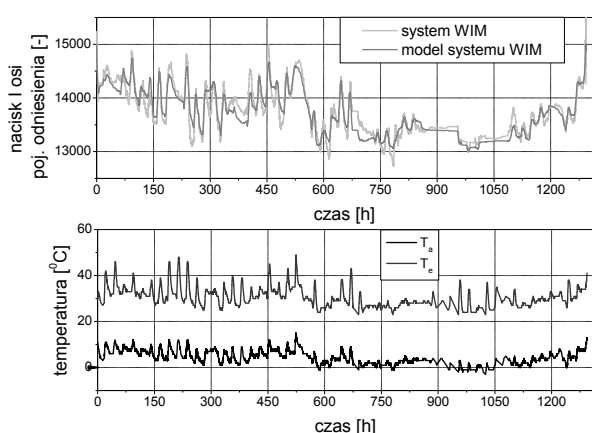
Wyznaczenie modelu systemu WIM, wymaga rejestracji wyników ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia oraz temperatury asfaltu, przy czym rejestracja tych danych powinna odbywać się w sposób ciągły, w okresie co najmniej kilkunastu dni. W bazie wyników ważenia, którą dysponuje autor, warunkom tym odpowiadały rejestracje z Gardawic z okresu 17.11.2006 do 10.01.2007. W tym czasie zarejestrowano wyniki ważenia 350 tys. pojazdów, w tym niemal 20 tys. pojazdów odniesienia.

Parametry  $N_S$  i  $T_C$  algorytmu identyfikacji przyjęto zgodnie z wynikami uzyskanymi podczas badań symulacyjnych.

Za klasę modelu, przyjęto zależność (7) i wykorzystując opisaną metodę identyfikacji obliczono wartości współczynników modelu:  $k=2.07$ ,  $w=0.00504$ . Wyznaczony w ten sposób model niestacjonarności systemu WIM w Gardawicach ma zatem postać:

$$y_m(i) = \mu_0 \cdot \left( 2.07 \cdot 10^{0.00504 \cdot T_a^m(i)} \right) + \mu_0 \cdot \sigma_z \cdot z(i) \quad (9)$$

Do oceny dopasowania wyznaczonego modelu do systemu WIM po raz kolejny użyto funkcjonału (8). Skuteczna niepewność względna, będąca miarą różnicy pomiędzy wynikami ważenia z systemu WIM, a wynikami uzyskanymi z wyznaczonego modelu tego systemu wyniosła 1.14%.



Rys. 4. Porównanie wyników z systemu WIM oraz z modelu tego systemu

Fig. 4. Results obtained from WIM system and from this system model

Do oceny dopasowania wyznaczonego modelu do systemu WIM po raz kolejny użyto funkcjonału (8). Skuteczna niepewność względna, będąca miarą różnicy pomiędzy wynikami ważenia z systemu WIM, a wynikami uzyskanymi z wyznaczonego modelu tego systemu wyniosła 1.14%. Współczynnik korelacji zdefiniowany na tych samych wynikach ważenia wyniósł 0.93. Bardzo mała wartość niepewności względnej i duża wartość współczynnika korelacji wskazuje na bardzo dobre odwzorowanie właściwości systemu WIM w modelu.

Wykorzystując zbudowany model, można w sposób ilościowy oszacować wpływ zmian temperatury asfaltu na zmianę wyników ważenia, poprzez obliczenie stosunku wartości współczynnika kalibracji dla różnych temperatur asfaltu. Przyjmując, że w ciągu dnia temperatura asfaltu może się zmieniać o 30°C (np. dzień - noc), to zgodnie z przyjętym modelem systemu stosunek wyników ważenia tego samego pojazdu w różnych temperaturach wynosi:

$$k_{Ta} = \frac{\mu_0 \cdot (2.07 \cdot 10^{0.00504 \cdot 30})}{\mu_0 \cdot (2.07 \cdot 10^{0.00504 \cdot 0})} = \frac{2.92}{2.07} = 1.41 \quad (10)$$

Czterdziestoprocentowa zmiana wyników ważenia w ciągu dnia uniemożliwia wiarygodne wykorzystanie systemów WIM jako wag preselekcyjnych, nie wspominając o ich zastosowaniu administracyjnym. Niestacjonarność systemu, obok pionowych wahań

pojazdów, należy więc uznać za jedną z głównych przyczyn ograniczonej dokładności wyników ważenia i zjawisku temu należy zdecydowanie przeciwdziałać.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule wyniki badań jednoznacznie dowodzą, że systemy WIM wyposażone w polimerowe czujniki nacisku są niestacjonarne. Ich właściwości zmieniają się w skutek zmiany konsystencji asfaltu wywołanej zmianami temperatury otoczenia. Wyznaczony model współpracy czujników nacisku z nawierzchnią asfaltową dla systemu ważącego w Gardawicach przyjął postać zdefiniowaną zależnością (9). Przedstawiona analiza pokazuje jednoznacznie, że klasa modelu i jego współczynniki zostały wyznaczone poprawnie. Struktura modelu niestacjonarności systemu uwzględniająca jedynie oddziaływanie temperatury asfaltu jest wystarczająca. Brak wpływu temperatury aparatury pomiarowej oraz wilgotności powietrza na wynik ważenia został potwierdzony. Mała wartość niepewności dopasowania modelu do obiektu (1.14%) umożliwia przyjęcie tezy, że cel modelowania systemu WIM został osiągnięty.

Zbudowany model może posłużyć, jako podstawa badań symulacyjnych systemów WIM, w szczególności badań wrażliwościowych różnych algorytmów akwizycji i przetwarzania danych w systemach niestacjonarnych.

Pozycje literaturowe powinny być numerowane tak samo jak w tekście artykułu i zestawione na końcu artykułu w kolejności cytowania. Opisy poszczególnych pozycji literaturowych należy wyjustować i numerować zgodnie z podanym przykładem. Tytuły obcojęzyczne powinny być podawane w pisowni oryginalnej.

Artykuł zgodnie z przedstawionym opisem należy przygotować w edytorze M. Word 2003 (w formacie DOC) oraz w pliku PDF.

## 6. Literatura

- [1] Burnos P.: Czujniki nacisku stosowane w systemach WIM, Materiały konferencji zorganizowanej z okazji Jubileuszu 90 – lecia AGH, Kraków, 28-29 maja 2009, 211-212.
- [2] Burnos P., Gajda J.: Autokalibracja systemów ważenia pojazdów samochodowych w ruchu, Modelowanie i symulacja systemów pomiarowych - materiały XV sympozjum : Krynica, 18-22 września 2005, 123-132.
- [3] Burnos P., Gajda J., Piwowar P., Sroka R., Stencel M., Żegleń T.: Wieloczujnikowy system ważenia pojazdów samochodowych w ruchu, PAK., vol. 53 nr 9 bis (2007), 542-545.
- [4] Gawęł I., Kalabińska M., Piłat J.: Asfalty drogowe, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2001.
- [5] Gajda J.: Analiza Błędów oraz Optymalizacja Parametryczna Systemów Pomiarowych Metodami Badań Modelowych, Seminarium Komitetu Metrologii Polskiej Akademii Nauk, 2000.
- [6] Cebon D.: Handbook of Vehicle – Road Interaction, Lisse: Swets&Zeitlinger Publishers, 1999.
- [7] Jacob B., Dolcemascolo V.: Spatial Repeatability of Dynamic Loading On a Pavement, Pre-Proceedings, COST323 – Weigh in Motion of Road Vehicles, 2nd European Conference, Lisbona 1998, 291 – 302.

otrzymano / received: 19.06.2010

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2010

artykuł recenzowany