

Janusz GAJDA, Ryszard SROKA, Marek STENCEL, Tadeusz ŻEGLEŃ

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA METROLOGII

Modelowanie i badania symulacyjne wieloczuJNIKOWEGO systemu ważenia pojazdów samochodowych w ruchu

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. 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. W1998r. uzyskał stopień doktora na tym samym wydziale. Autor ponad 40 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. 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@agh.edu.pl



Dr inż. Tadeusz ŻEGLEŃ

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: tezet@agh.edu.pl



Streszczenie

Praca dotyczy problemu projektowania i badania systemów MS-WIM (Multi-Sensor Weigh in Motion), które pozwalają ważyć poruszające się pojazdy samochodowe, bez nakładania istotnych ograniczeń na ich prędkość. Głównym etapem procesu projektowania jest modelowanie podstawowych elementów takiego systemu i badania symulacyjne prowadzone na tych modelach. W pracy przedstawiono modele wieloczuJNIKOWEGO stanowiska ważącego, nawierzchni drogi, zawieszenia mechanicznego ważonego pojazdu oraz modele algorytmów estymacji nacisków statycznych oraz masy całkowitej pojazdu. Przedstawione modele zostały zweryfikowane poprzez porównanie wyników rozważań analitycznych prowadzonych przy przyjętych założeniach upraszczających z wynikami badań symulacyjnych przeprowadzonych na tych modelach. Celem projektowania systemu MS-WIM jest znalezienie takich wartości parametrów wymienionych elementów systemu, które pozwolą ograniczyć niepewność wyniku ważenia do poziomu 2%, bez specjalnego ograniczania prędkości pojazdu. Uzyskane wyniki pokazują, że ten cel może zostać osiągnięty w systemie ważącym wyposażonym w co najmniej 16 linii czujników nacisku.

Słowa kluczowe: parametry ruchu drogowego, ważenie pojazdów samochodowych, ważenie w ruchu, badania symulacyjne, projektowanie systemów pomiarowych.

Modeling and Simulation Tests of the Multi-Sensor Weighing System for Moving Vehicles

Abstract

The paper addresses the problem of design of the Multi-Sensor Weigh in Motion (MS-WIM) systems, which allow weighing the moving vehicles without serious limitation of their velocity. The main stage of the system design is its modeling and simulation tests. The simulation tests are conducted on the models describing the main elements of the MS-WIM system which are as follows: - model of multi-sensor WIM site, model of road surface, model of weighed vehicle suspension and model of data processing algorithm. The mathematical models of all elements are presented in the paper. The presented models were validated by comparing the results of analytical analysis conducted for assumed simplification to the simulation results obtained for the models. The aim of the system design is finding such parameters of the mentioned system elements,

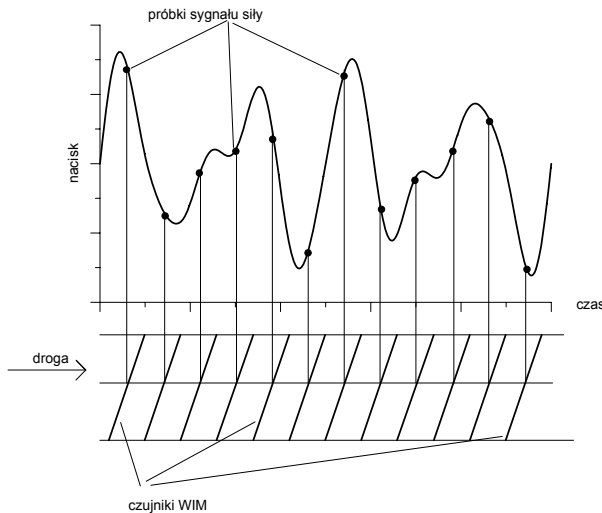
which allow limiting the weighing uncertainty to the level of 2%, without serious limiting of the vehicles velocity. The obtained results show, that this aim could be reached using MS-WIM system equipped with at least 16 load sensors.

Keywords: road traffic parameters, vehicles weighing, weighing in motion, simulation tests, measurement systems design.

1. Wstęp

WieloczuJNIKOWE systemy ważenia pojazdów samochodowych są konstruowane w celu ograniczenia błędów i zmniejszenia niepewności wyniku ważenia do takiego poziomu, aby mógł on być wykorzystywany w działaniach administracyjnych, prowadzących do eliminacji z ruchu pojazdów przeciążonych. Tego typu systemy oznaczane są akronimem MS-WIM, który pochodzi od ich angielskojęzycznej nazwy *Multi – Sensor Weigh In Motion Systems*. Systemy MS-WIM są instalowane w pasie ruchu i umożliwiają ważenie pojazdów samochodowych poruszających się z prędkościami drogowymi, bez nakładania dodatkowych ograniczeń na ich prędkość lub tor ruchu, poza wynikającymi z przepisów ruchu drogowego. W Europie powstają obecnie dwa eksperymentalne systemy MS-WIM (Holandia, Polska). Jeden taki system istnieje w Niemczech. Jeden system MS-WIM jest również eksploatowany w Korei Południowej, ale doniesienia literaturowe na ten temat są bardzo skąpe. Celem, do którego obecnie dążą konstruktorzy systemów MS-WIM jest ograniczenie błędu ważenia do poziomu 2%, przy prędkościach ważonych pojazdów zawartych w przedziale 20 – 80 km/h.

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 (tzw. masy zawieszonyj) oraz podskakiwaniem kół (tzw. masy nie zawieszonyj). Amplituda oraz widmo częstotliwościowe składowej zmiennej zależą od właściwości konstrukcyjnych pojazdu, prędkości jazdy oraz nierówności nawierzchni. Siła nacisku jest próbkowana w chwilach czasowych, w których położenie osi ważonego pojazdu odpowiada lokalizacji kolejnego czujnika nacisku (rysunek 1).



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

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.

Zebrane w ten sposób próbki siły nacisku są podstawą estymacji nacisku statycznego każdej z osi ważonego pojazdu. To z kolei pozwala wyznaczyć jego masę całkowitą. Głównymi przyczynami ograniczającymi dokładność ważenia są pionowe wahanie i podskakiwanie pojazdu lub jego elementów (błąd ważenia spowodowany tą przyczyną może przekraczać nawet 40%), niedokładność stosowanych czujników nacisku (2 – 7%), czynniki zakłócające, a przede wszystkim zmiana temperatury nawierzchni drogi, w której są umieszczone czujniki (nawet 200% w przypadku czujników piezoelektrycznych). Ograniczenie błędów ważenia można osiągnąć poprzez zastosowanie dokładniejszych czujników (np. kwarcowych w miejsce piezoelektrycznych), zwiększenie ich liczby i dobranie odległości pomiędzy nimi odpowiednio do zakresu prędkości i właściwości konstrukcyjnych ważonych pojazdów, a także poprzez odpowiedni dobór algorytmu estymacji nacisku statycznego.

Celem przeprowadzonych badań modelowych i symulacyjnych było poszukiwanie odpowiedzi na podstawowe pytanie związane bezpośrednio z zagadnieniem projektowania stanowiska MS-WIM, dotyczące spodziewanych błędów ważenia w przypadku wyposażenia tego stanowiska w ustaloną liczbę czujników (ten parametr stanowiska jest na ogół narzucony warunkami finansowymi). Budowane stanowisko MS-WIM zostało wyposażone w 16 piezoelektrycznych czujników. Stąd identyczną liczbę czujników przyjęto w przeprowadzonych badaniach symulacyjnych.

Podstawowym zagadnieniem związanym z badaniami symulacyjnymi jest budowa modeli matematycznych i symulacyjnych badanego systemu pomiarowego (często wraz z modelem obiektu pomiarów) oraz weryfikacja poprawności wykorzystywanych modeli. Stąd też w pierwszej części pracy przedstawiono modele stanowiska MS-WIM, nawierzchni drogi, w której są zamontowane czujniki oraz mechanicznych właściwości ważonego pojazdu. Następnie porównano wyniki wybranych badań symulacyjnych z prezentowanymi w literaturze wynikami rozważań teoretycznych [1] uzyskując bardzo dobrą zgodność.

Jest oczywiste, że rozważania teoretyczne mogą być efektywnie prowadzone tylko w niektórych przypadkach, po przyjęciu wielu założeń upraszczających. Jednak tak zweryfikowane modele symulacyjne mogą zostać następnie wykorzystane do badania bardziej złożonych, rzeczywistych systemów MS-WIM.

2. Model stanowiska MS-WIM

Celem uproszczenia modelu stanowiska MS-WIM przyjęto następujące założenia [1]:

1. czujniki są rozmieszczone równomiernie,
2. przetwarzanie sygnałów pomiarowych polega na zwykłym uśrednianiu, (metoda ta wymaga prostych obliczeń i pozwala uzyskać porównywalne wyniki jak metody bardziej złożone),
3. sygnał pomiarowy (siła nacisku) jest sygnałem sinusoidalnym ze składową stałą:

$$p(t) = P_0 + P \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

gdzie:

- P_0 - składowa statyczna siły nacisku,
- P - amplituda składowej dynamicznej,
- $\omega = 2\pi f$ - pulsacja,
- f - częstotliwość,
- φ - początkowy kąt fazowy,

4. ważony pojazd porusza się ze stałą prędkością V wzdłuż stanowiska WIM, zawierającego n czujników, rozmieszczonych w odległości Δ jeden od drugiego,
5. sygnały z czujników są pozbagowane jakichkolwiek zakłóceń, a czujniki są idealnie dokładne.

Przy założeniu, że siła $p(t)$ działa na pierwszy czujnik w chwili $t = 0$, wynik \bar{P} uśredniania n kolejnych próbek jest opisany zależnością:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{n} \left[P_0 + P \cdot \sin(\varphi) + P_0 + P \cdot \sin\left(\omega \frac{\Delta}{V} + \varphi\right) + P_0 + P \cdot \sin\left(\omega \frac{2\Delta}{V} + \varphi\right) + \dots \right. \\ &\quad \left. + P_0 + P \cdot \sin\left(\omega \frac{(n-1)\Delta}{V} + \varphi\right) \right] = \\ &= P_0 + \frac{P}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \sin\left(\frac{j\omega\Delta}{V} + \varphi\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Wynik uśredniania \bar{P} jest traktowany jako ocena składowej statycznej siły nacisku. Względny błąd pomiaru składowej statycznej został zdefiniowany w postaci (3).

$$\varepsilon = \frac{\bar{P} - P_0}{P} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \sin\left(\frac{j\omega\Delta}{V} + \varphi\right) \quad (3)$$

Należy podkreślić, że błąd (3) jest znormalizowany względem amplitudy składowej dynamicznej nacisku. Definiując bezwymiarową odległość pomiędzy czujnikami:

$$\delta = \frac{\omega\Delta}{2\pi \cdot V} = \frac{\Delta}{V/f} \quad (4)$$

można przekształcić błąd (3) do postaci (5).

$$\varepsilon(n, \delta, \varphi) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \sin(j2\pi\delta + \varphi) \quad (5)$$

Jeżeli założymy, że dla populacji ważonych pojazdów φ jest zmienną przypadkową o rozkładzie równomiernym, opisanym funkcją gęstości prawdopodobieństwa $g(\varphi)$ postaci (6)

$$g(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{dla } -\pi \leq \varphi \leq \pi \\ 0 & \text{poza tym} \end{cases} \quad (6)$$

to wartość średniokwadratowa błędu (5) jest opisana zależnością (7).

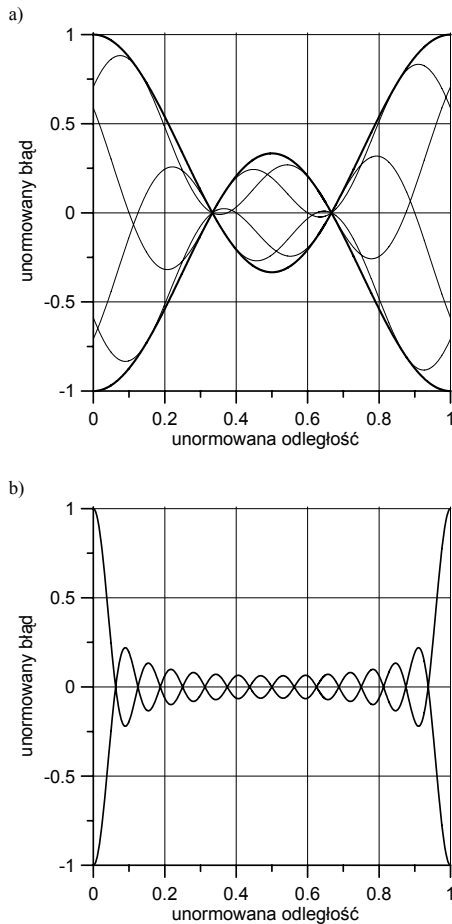
$$E[\varepsilon(n, \delta)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} [\varepsilon(n, \delta, \varphi)]^2 g(\varphi) d\varphi = \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \sin(j2\pi\delta + \varphi) \right]^2 \frac{1}{2\pi} d\varphi = \frac{1}{2n} + \frac{1}{n^2} \sum_{j=1}^{n-1} (n-j) \cos(j2\pi\delta) \quad (7)$$

Błąd skuteczny rozumiany jako pierwiastek z błędu średniokwadratowego jest natomiast postaci (8)

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{E[\varepsilon(n, \delta)^2]} \quad (8)$$

a błąd maksymalny (amplitudowy) jest opisany zależnością (9).

$$\varepsilon_m(n, \delta) = \pm \sqrt{2} \varepsilon_{RMS} = \pm \left[\frac{1}{n} + \frac{2}{n^2} \sum_{j=1}^{n-1} (n-j) \cos(j2\pi\delta) \right]^{0.5} \quad (9)$$



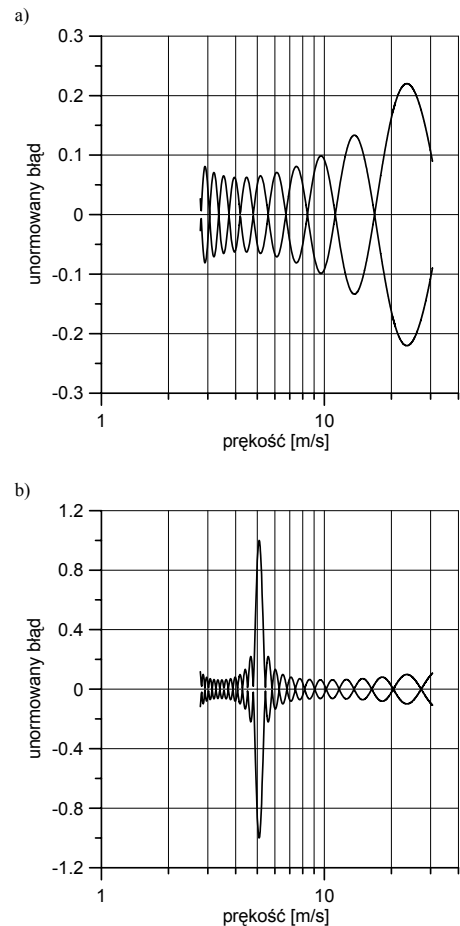
Rys. 2. Zależność błędu amplitudowego (9) od unormowanej odległości δ dla różnej liczby czujników: a) $n = 3$ i b) $n = 16$. Na rysunku a) cienkimi liniami zaznaczono realizacje błędu (5) dla kilku wartości kąta fazowego φ

Fig. 2. Dependence of the error (9) on the normalized distance δ for different sensors number: a) $n = 3$ and b) $n = 16$ respectively. The thin lines in the Figure a) illustrate the error (5) realizations corresponding to different values of the phase angle φ

Na rysunkach 2 (oraz następnych 3, 4, 5) widoczne są dwie symetryczne krzywe, odpowiadające znakom \pm w zależności (9). Ograniczają one maksymalny obszar, w którym będzie się zawierał błąd skuteczny ważenia każdego pojazdu. Oznacza to, że dla danego stanowiska MS-WIM, odległość pomiędzy rzędnymi obu

krzywych, odczytanymi z tych wykresów dla ustalonej odległości pomiędzy czujnikami, określa maksymalny przedział, w którym zawiera się błąd ważenia każdego pojazdu na tym stanowisku. W tym przedziale mieszczą się wszystkie realizacje błędu (5) odpowiadające kolejnym ważonym pojazdom, dla których sygnały siły (1) różnią się w sposób losowy wartościami początkowego kąta fazowego φ .

Błąd (9) zależy oczywiście od pulsacji ω siły generowanej przez koła jadącego pojazdu, jak również od jego prędkości (zależność poprzez (4)). Wpływ ten będzie widoczny w przebiegu błędu (9), jeżeli odpowiednie wykresy zostaną wykonane dla zadanej wartości bezwzględnej odległości międzyczujnikowej Δ (rysunki 3, 4 i 5). Wszystkie charakterystyki zostały wyznaczone dla liczby czujników $n = 16$.



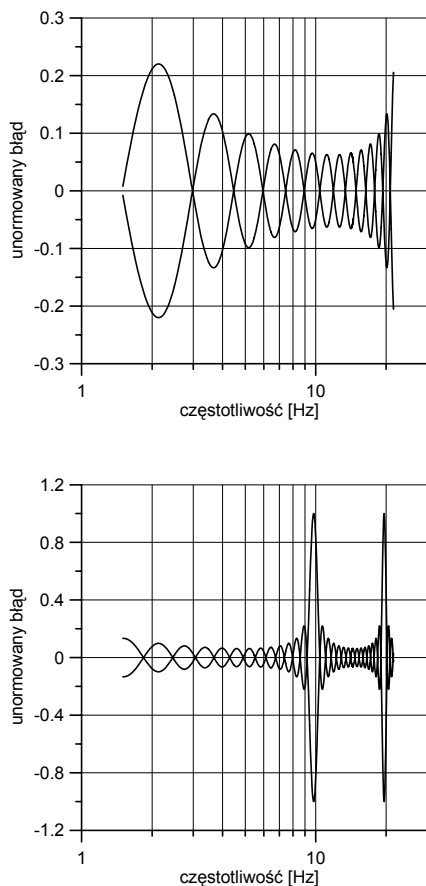
Rys. 3. Wpływ prędkości ważonego pojazdu na błąd (9), wyznaczony dla częstotliwości $f = 3$ Hz oraz odległości pomiędzy czujnikami równej odpowiednio $\Delta = 0.7$ m i $\Delta = 1.7$ m

Fig. 3. Influence of the velocity of weighed vehicle on the error (9) for frequency of load dynamic component $f = 3$ Hz and for sensors distances $\Delta = 0.7$ m and $\Delta = 1.7$ m respectively

Maksimum obserwowane na rysunku 3b odpowiada częstotliwości próbkowania

$$\frac{V}{\Delta} = \frac{5.1 \text{ m/s}}{1.7 \text{ m}} = 3 \text{ Hz} = f,$$

a więc jedna próbka przypada na jeden okres składowej dynamicznej nacisku. Jak widać, w takim przypadku średnia jest złą oceną nacisku statycznego (uśrednianie nie ogranicza skutecznie zakłócającego wpływu składowej dynamicznej nacisku). Podobne zjawisko można zaobserwować na charakterystykach przedstawionych na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Wpływ częstotliwości f składowej dynamicznej nacisku na błąd (9) wyznaczony dla prędkości pojazdu $V = 60 \text{ km/h}$ i odległości pomiędzy czujnikami równej odpowiednio $\Delta = 0.7 \text{ m}$ oraz $\Delta = 1.7 \text{ m}$

Fig. 4. Influence of the frequency f of load dynamic component on the error (9), for weighed vehicle velocity $V = 60 \text{ km/h}$ and for sensors distances $\Delta = 0.7 \text{ m}$ and $\Delta = 1.7 \text{ m}$ respectively

Dotychczasowe rozważania opierały się na założeniu, że sygnał mierzonej siły nacisku jest sygnałem monoharmonicznym. W rzeczywistości sygnał generowany przez koła ważonego pojazdu ma znacznie bardziej bogate widmo częstotliwościowe. Załóżmy, że widmo częstotliwościowe sygnału siły nacisku jest opisane funkcją gęstości widmowej mocy $S_{pp}(\omega)$. W takim przypadku błąd $\varepsilon_m(n, \delta)$ (9) może być interpretowany jako funkcja przejścia (transmitancja) systemu MS-WIM, który jest pobudzany sygnałem siły o gęstości widmowej mocy $S_{pp}(\omega)$ i odpowiada sygnałem błędu ważenia o gęstości widmowej mocy $S_{ee}(\omega)$. Określony w dziedzinie częstotliwości związek pomiędzy wymuszeniem $S_{pp}(\omega)$, transmitancją stanowiska pomiarowego $\varepsilon_m(n, \delta)$ oraz jego odpowiedzią jest postaci (10).

$$S_{ee}(\omega) = \varepsilon_m(n, \delta)^2 \cdot S_{pp}(\omega) \quad (10)$$

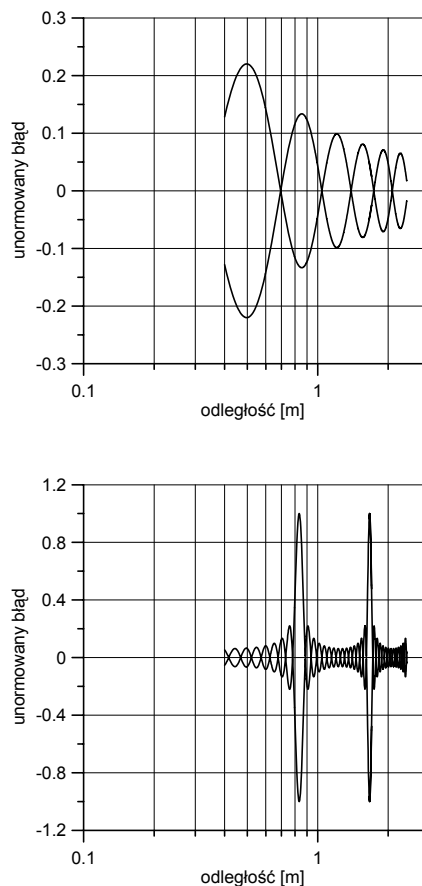
gdzie:

$S_{ee}(\omega)$ - jednostronna gęstość widmowa mocy sygnału błędu,

$\delta = \frac{\omega \Delta}{2\pi V}$ - unormowana odległość pomiędzy czujnikami.

Odchylenie standardowe tego błędu jest opisane zależnością (11a):

$$\sigma(n) = \left[\int_0^{\infty} S_{ee}(\omega) d\omega \right]^{0.5} \quad (11a)$$



Rys. 5. Wpływ odległości pomiędzy czujnikami Δ na przebieg błędu (9), dla prędkości ważonego pojazdu $V = 60 \text{ km/h}$ oraz dwóch różnych częstotliwości składowej dynamicznej nacisku równych kolejno $f = 3 \text{ Hz}$ i $f = 20 \text{ Hz}$

Fig. 5. Influence of the sensors distances Δ on the error (9) for weighed vehicle velocity $V = 60 \text{ km/h}$ and for frequencies of load dynamic component $f = 3 \text{ Hz}$ and $f = 20 \text{ Hz}$ respectively

Częstotliwościowe właściwości siły nacisku są scharakteryzowane przez jej gęstość widmową mocy $S_{pp}(\omega)$ i zależą od zmienności wysokości nawierzchni (profilu) drogi, po której jedzie ważony pojazd oraz od mechanicznych właściwości tego pojazdu. Profil drogi charakteryzuje się poprzez określenie widmowej gęstości mocy wysokości nawierzchni $[S_u(\omega)]$. Zagadnienie to zostanie szerzej omówione w rozdziale 3. Właściwości dynamiczne pojazdu, przy założeniu liniowości, opisuje macierz transmitancji mechaniki pojazdu $[H(j\omega)]$. Macierz $[H(j\omega)]$ opisuje związek pomiędzy wymuszeniem działającym na każde koło ważonego pojazdu, którym jest zmienna w czasie wysokość nawierzchni, a odpowiedzią tego układu, którą jest zmienna w czasie siła nacisku każdego koła na nawierzchnię. Wymiar macierzy $[H(j\omega)]$ zależy od liczby kół w modelowanym pojeździe. Związek pomiędzy gęstością widmową mocy siły nacisku $S_{pp}(\omega)$, widmową gęstością mocy profilu drogi $[S_u(\omega)]$ i macierzą transmitancji mechaniki pojazdu $[H(j\omega)]$ jest postaci (11b).

$$S_{pp}(\omega) = [H(j\omega)]^* \cdot [S_u(\omega)] \cdot [H(j\omega)]^T \quad (11b)$$

gdzie:

* - oznacza wielkość zespoloną sprzężoną.

Dla przyjętego profilu drogi i ustalonych parametrów mechanicznych pojazdu gęstość widmowa siły nacisku (11b) zależy od prędkości, z jaką ważony pojazd przejeżdża przez stanowisko MS-WIM.

Ostatecznie odchylenie standardowe sygnału błędu przyjmuje postać (11c):

$$\sigma(n) = \left[\int_0^{\infty} \varepsilon_m(n, \delta)^2 \cdot [H(j\omega)]^* \cdot [S_u(\omega)] \cdot [H(j\omega)]^T d\omega \right]^{0.5} \quad (11c)$$

Wyrażenie (11c) może być interpretowane jako oczekiwane odchylenie standardowe estymatora siły nacisku statycznego dla wielu różnych osi o podobnych właściwościach dynamicznych, przejeżdżających przez określone stanowisko MS-WIM.

Jako miarę jakości stanowiska MS-WIM można przyjąć odchylenie standardowe sygnału błędu, unormowane względem rzeczywistej wartości nacisku statycznego P_0 (12).

$$\rho(n) = \frac{\sigma(n)}{P_0} \quad (12)$$

Dla idealnego systemu $\rho(n) = 0$. Dla stanowiska WIM z jednym czujnikiem kryterium jakości (12) jest równe stosunkowi wartości skutecznej składowej dynamicznej nacisku do składowej statycznej.

3. Model nawierzchni jezdni

Z wyrażen (10) i (11) wynika, że jakość stanowiska MS-WIM oceniana kryterium (12) zależy bezpośrednio od jakości nawierzchni drogi w miejscu montażu czujników nacisku oraz w jego najbliższym sąsiedztwie. Standard ISO dla nierówności drogi został opracowany w 1972 roku. Podstawą były wyniki bardzo szeroko zakrojonych pomiarów nierówności nawierzchni dróg prowadzone w Europie. Profil drogi charakteryzuje gęstość widmowa mocy wysokości drogi względem poziomu odniesienia [2]. Wysokość nawierzchni (profil) drogi jest sygnałem mechanicznym, którego zmiany wzdłuż drogi jadącego pojazdu pobudzają do drgań jego koła. Widmo częstotliwościowe tego sygnału zależy od prędkości pojazdu, a jego moc zależy od amplitud poszczególnych składowych częstotliwościowych. Te właściwości profilu drogi charakteryzuje właśnie jego gęstość widmowa mocy zdefiniowana zgodnie z przyjętym standardem ISO zależnością (13).

$$S_u(k) = \begin{cases} S_u(k_0) \cdot \left(\frac{k}{k_0}\right)^{-n_1} & \frac{k}{k_0} \leq 1 \\ S_u(k_0) \cdot \left(\frac{k}{k_0}\right)^{-n_2} & \frac{k}{k_0} > 1 \end{cases} \quad (13)$$

gdzie:

k - numer fali określający liczbę okresów przypadającą na jeden metr,

k_0 - numer fali odniesienia, $k_0 = 1/(2\pi)$,

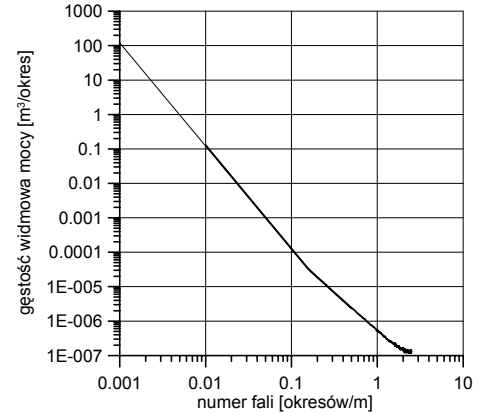
n_1, n_2 - stałe współczynniki modelu, $n_1 = 3$, $n_2 = 2.25$,

$S_u(k_0)$ - gęstość widmowa mocy dla fali odniesienia.

Wartość ta została stabelaryzowana dla pięciu różnych klas jakości drogi, poczynając od „bardzo dobrej” aż do „bardzo złej”.

Na rysunku 6 przedstawiono gęstość widmową mocy wysokości nawierzchni dla drogi, której jakość znajduje się na granicy pomiędzy klasami „dobra” a „przeciętna” tj. dla

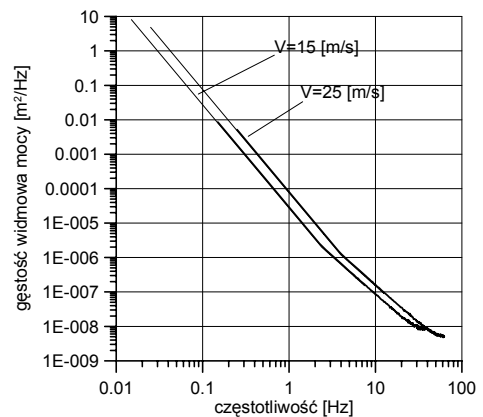
$$S_u(k_0) = 30 \cdot 10^{-6} \left[m^3 / \text{okres} \right].$$



Rys. 6. Gęstość widmowa mocy opisująca zmienność wysokości (nierówności) nawierzchni drogi, wyrażona w funkcji numeru fali. Linia cienka odpowiada opisowi analitycznemu w postaci (13). Linia pogrubiona przedstawia wynik estymacji tej charakterystyki na podstawie 100 komputerowo wygenerowanych odcinków drogi o ustalonych parametrach jakościowych

Fig. 6. Spectral power density of the road surface roughness as a function of the wave number. Thin line corresponds to the analytic description (13) and the thick one presents this characteristic estimation results

Aby niezależnie się od prędkości pojazdu charakterystykę (13) wyrażono w funkcji numeru fali k . Każdy pojazd jadący po takiej nawierzchni z prędkością V , jest poddawany działaniu zmiennego w czasie wymuszenia mechanicznego pochodzącego od tej nawierzchni. Widmo częstotliwościowe tego wymuszenia wynika zarówno z charakterystyki (13) jak też z prędkości jazdy. Związek pomiędzy gęstością widmową mocy $S_u(k)$ wyrażoną w funkcji długości fali i w funkcji częstotliwości jest postaci (14).



Rys. 7. Gęstość widmowa mocy opisująca nierówność nawierzchni drogi, wyrażona w funkcji częstotliwości dla wybranych prędkości jazdy. Linia cienka odpowiada opisowi analitycznemu w postaci (14). Linia pogrubiona przedstawia wynik estymacji tej charakterystyki na podstawie 100 komputerowo wygenerowanych odcinków drogi o ustalonych parametrach jakościowych

Fig. 7. Spectral power density of the road surface roughness as a function of the frequency, for different traffic velocity. Thin line corresponds to the analytic description (13) and the thick one presents this characteristic estimation results

$$S_u(f) = \frac{1}{V} \cdot S_u(k) \quad (14)$$

gdzie:

$S_u(k)$ - gęstość widmowa mocy wyrażona w funkcji numeru fali k opisana zależnością (13), $[S_u(k)] = \frac{m^3}{\text{okres fali}}$

V - prędkość pojazdu wyrażona w $\frac{m}{s}$,

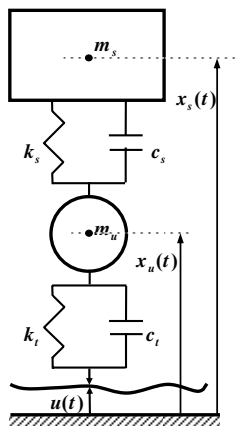
$S_u(f)$ - gęstość widmowa mocy wysokości nawierzchni

wyrażona w funkcji częstotliwości f , $[S_u(f)] = \frac{m^2}{Hz}$.

Na rysunku 7 przedstawiono gęstość widmową mocy wysokości nawierzchni wybranej klasy drogi, wyznaczoną na podstawie zależności (14) (cienkie linie) oraz wynik jej estymacji na podstawie symulacyjnie wygenerowanych 100 odcinków modelu nawierzchni (linie pogrubione), dla prędkości $V = 15 \left[\frac{m}{s} \right]$ oraz $V = 25 \left[\frac{m}{s} \right]$. Charakterystyki te potwierdzają poprawność zależności (14).

4. Model mechanicznych właściwości pojazdu

Kolejnym czynnikiem mającym istotny wpływ na błąd (12) wazenia pojazdu są mechaniczne właściwości jego zawieszenia. Najprostszym modelem tych właściwości jest model opisujący zachowanie się ¼ samochodu (model typu „quarter”), o schemacie przedstawionym na rysunku 8. Mechaniczna transmitancja tego modelu jest opisana równaniem postaci (15) [2, 3].



Rys. 8. Model typu „quarter”
Fig. 8. Quarter model of the vehicle

$$H(j\omega) = \frac{F(j\omega)}{U(j\omega)} = \frac{(k_t + c_t s) - (m_s s^2 + c_s s + k_s) \cdot (c_t s + k_t)^2}{(m_u s^2 + (c_s + c_t) s + k_s + k_t) \cdot (m_s s^2 + c_s s + k_s) - (k_s + c_s s)^2} \quad (15)$$

gdzie:

$$s = j\omega,$$

$$m_s = 8900 \text{ kg} - \text{masa zawieszona},$$

$$m_u = 1100 \text{ kg} - \text{masa nie zawieszona},$$

$$k_s = 2 \cdot 10^6 \text{ N/m} - \text{współczynnik sprężystości zawieszenia},$$

$$k_t = 3.5 \cdot 10^6 \text{ N/m} - \text{współczynnik sprężystości opony},$$

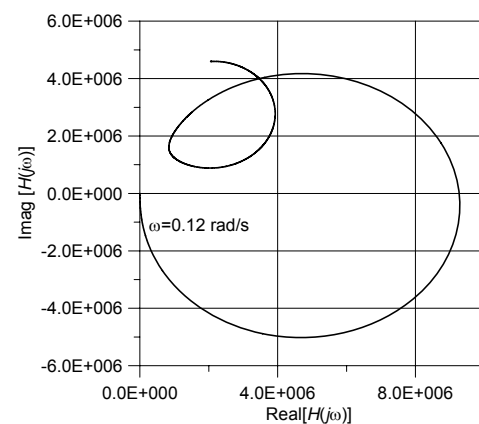
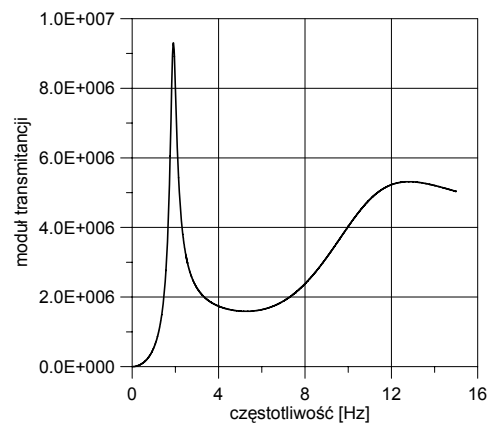
$$c_s = 40000 \text{ Ns/m} - \text{współczynnik tłumienia zawieszenia},$$

$$c_t = 4000 \text{ Ns/m} - \text{współczynnik tłumienia opony},$$

$$U(j\omega) - \text{transformata Fouriera wysokości nawierzchni},$$

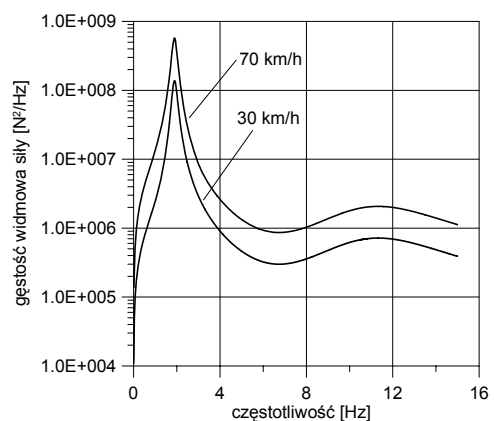
$$F(j\omega) - \text{transformata Fouriera siły nacisku}.$$

Charakterystyki częstotliwościowe transmitancji (15) przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Charakterystyki częstotliwościowe transmitancji (15)
Fig. 9. The frequency characteristics of the transfer function (15)

Gęstość widmową mocy siły nacisku $S_{pp}(f)$ opisuje zależność (11b). Jej przebieg w funkcji częstotliwości, odpowiadający symulowanemu modelowi pojazdu, przyjętemu profilowi nawierzchni, zgodnemu z charakterystyką przedstawioną na rysunku 6 i prędkości jazdy 30 km/h oraz 70 km/h przedstawia rysunek 10.

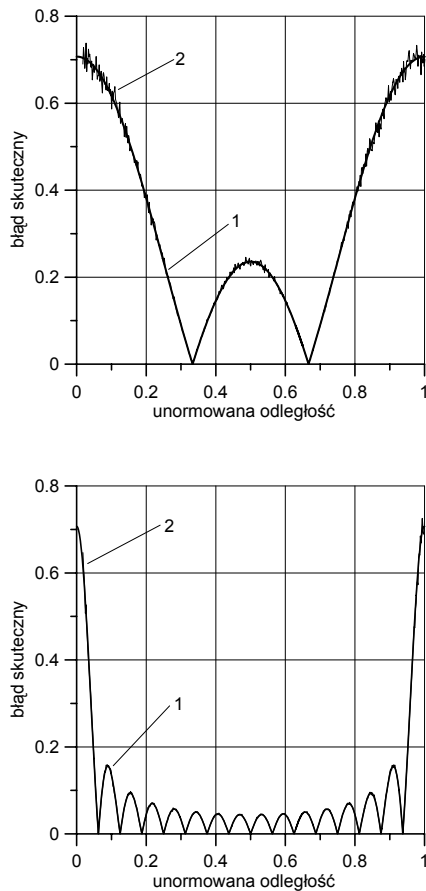


Rys. 10. Gęstość widmowa mocy siły nacisku $S_{pp}(f)$ wywieranej na nawierzchnię przez koło symulowanego modelu typu „quarter” dla różnych prędkości jazdy

Fig. 10. Spectral power density $S_{pp}(f)$ of the load exerted on the road surface by wheel of simulated quarter model, corresponding to different velocities

5. Weryfikacja modeli i badania symulacyjne

W celu weryfikacji poprawności implementacji modelu ważenia na stanowisku MS-WIM, wynikającego z przyjętych na wstępie rozdziału 2 założeń upraszczających 1-5 przeprowadzono komputerową symulację tego pomiaru. Uzyskane wyniki w postaci charakterystyk ilustrujących przebieg błędu skutecznego ε_{RMS} w funkcji unormowanej odległości międzyczujnikowej δ porównano z charakterystykami teoretycznymi (8), dla dwóch stanowisk o liczbach czujników wynoszących odpowiednio $n = 3$ i $n = 16$ (rysunek 11). Pełna zgodność pomiędzy wynikami badań symulacyjnych i charakterystykami teoretycznymi potwierdza poprawność komputerowej implementacji wszystkich przyjętych założeń upraszczających.



Rys. 11. Zależność błędu skutecznego estymacji składowej statycznej nacisku od unormowanej odległości δ , dla liczby czujników równej kolejno $n = 3$ i $n = 16$. 1 – krzywa teoretyczna, 2 – wynik symulacji
Fig. 11. Dependence of the rms-error of the load static component on the normalized sensors distance δ for different sensors numbers $n = 3$ i $n = 16$ respectively

Celem badań symulacyjnych jest ocena błędów ważenia pojazdów przez system MS-WIM, w warunkach jak najbardziej zbliżonych do rzeczywistości. Stąd również weryfikacja powinna dotyczyć modelu tego systemu o takich „rzeczywistych” cechach.

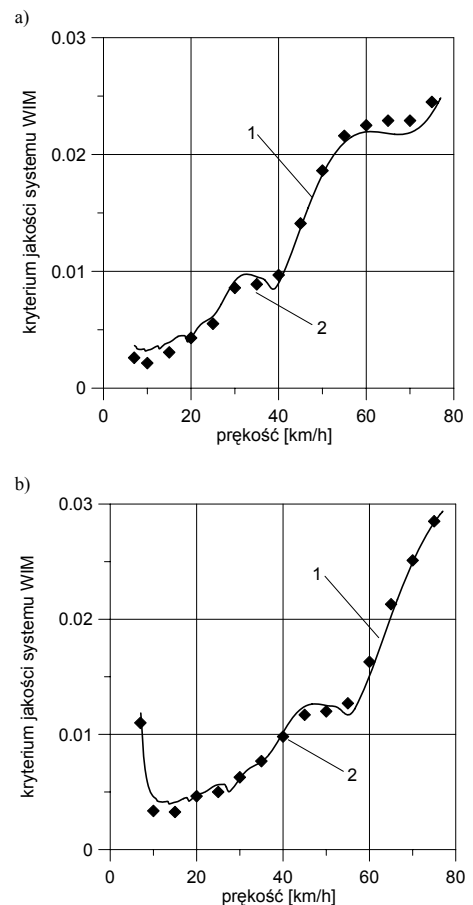
Symulacja procesu ważenia obejmuje symulację następujących zjawisk zachodzących podczas przejazdu przez stanowisko MS-WIM:

- generowanie przemieszczenia wymuszającego pionowy ruch każdego koła ważonego pojazdu. Wymuszeniem działającym na pojazd jest zmiana wysokości nawierzchni jezdni w funkcji przejechanej drogi, modelowana losową realizacją profilu drogi o parametrach zależnych od klasy drogi. Kolejne przejazdy ważonego pojazdu odbywają się po różnych realizacjach profilu, należących do danej populacji. Statystyczne właściwości tej populacji (charakterystyczne dla danej klasy drogi) są opisane gęstością widmową wysokości nawierzchni $S_u(k)$. W zależności

od prędkości pojazdu zmieniają się częstotliwościowe właściwości tego wymuszenia opisane gęstością widmową $S_u(\omega)$.

- wyznaczanie siły, z jaką koła ważonego pojazdu działają na nawierzchnię jezdni. Siła ta zmienia się w czasie i zawiera składową stałą wynikającą z masy ważonego pojazdu (siła grawitacji) oraz składową zmienną wynikającą z pionowych wahań zarówno całego pojazdu jak też jego kół, wywołanych zmianami wysokości nawierzchni. Podstawą wyznaczenia czasowego przebiegu tej siły jest znajomość (model) profilu drogi, po której porusza się ważony pojazd, prędkość pojazdu oraz jego transmitancja mechaniczna (przy założeniu liniowości obiektu), wiążąca pionowe przemieszczenia kół pojazdu z siłą oddziaływania tych kół na nawierzchnię. Prezentowane wyniki badań symulacyjnych uzyskano dla transmitancji mechanicznej pojazdu postaci (15).
- estymacja nacisku statycznego na podstawie próbek siły nacisku zarejestrowanych w miejscach lokalizacji kolejnych czujników.

Zaproponowane w [1] kryterium jakości systemu WIM postaci (12) uwzględnia wpływ zarówno mechanicznych właściwości ważonego pojazdu opisanych transmitancją $H(j\omega)$, prędkości ważonego pojazdu, nierówności drogi, po której jeździe ważony pojazd, scharakteryzowanej gęstością widmową mocy profilu drogi $S_u(\omega)$ oraz parametrów stanowiska MS-WIM takich jak liczba czujników nacisku oraz ich wzajemne odległości.



Rys. 12. Teoretyczna charakterystyka jakości systemu WIM w funkcji prędkości ważonego pojazdu (1) oraz punkty uzyskane w wyniku symulacji procesu ważenia (2), dla dwóch różnych odległości pomiędzy czujnikami nacisku wynoszących odpowiednio 0.7m (rysunek a) oraz 1.0m (rysunek b)

Fig. 12. Theoretic characteristic of the WIM system quality as a function of weighed vehicle velocity (1) and weighing process simulation results (2), for two different load sensors distances equal to 0.7m (Figure a) and 1.0 m (Figure b) respectively

Przy założeniu równomiernego rozłożenia czujników nacisku oraz przy estymacji nacisku statycznego poprzez proste uśrednianie nacisków zarejestrowanych na kolejnych czujnikach, wyznaczono analitycznie, dla zadanych wartości wymienionych parametrów i charakterystyk, wartość kryterium (12) w funkcji prędkości ważonego pojazdu. Wybrane punkty tej charakterystyki zostały również ocenione na podstawie wyników symulacji zjawiska przejazdu modelu pojazdu typu „quarter” przez model stanowiska MS-WIM oraz procesu ważenia. Weryfikację poprawności przyjętych modeli uzyskano porównując wartości kryterium (12) wyznaczone na podstawie wyników komputerowej symulacji zjawiska przejazdu ważonego pojazdu przez modelowane stanowisko MS-WIM z wartościami tego kryterium wyznaczonymi analitycznie (na podstawie zależności przedstawionych w rozdziałach 2 – 4), dla tych samych wartości parametrów poszczególnych elementów składowych systemu WIM. Wyniki tego porównania dla stanowiska MS-WIM wyposażonego w $n = 16$ czujników odległych od siebie o $\Delta = 0.7m$ i $\Delta = 1.0m$ przedstawiono na rysunku 12. Uzyskane wyniki potwierdzają poprawność implementacji przyjętych modeli stanowiska MS-WIM, nawierzchni oraz mechanicznych właściwości ważonego pojazdu. Pozytywnie zweryfikowany model symulacyjny zostanie wykorzystany do oceny błędów ważenia pojazdów w bardziej złożonych przypadkach, które nie poddają się analizie teoretycznej. Model ten pozwoli między innymi na ocenę wpływu różnych algorytmów estymacji nacisku statycznego, złożoności modelu mechaniki ważonego pojazdu, nierównomiernego rozłożenia czujników nacisku i różnych kryteriów oceny jakości systemu MS-WIM na błędy ważenia.

Duże zróżnicowanie parametrów poszczególnych pojazdów przejeżdżających przez stanowisko WIM, takich jak prędkość, masa całkowita, naciski na osie, konstrukcja zawieszenia i wynikające stąd liczba i parametry składowych dynamicznych zawartych w sygnale pomiarowym powodują, że błędy estymacji statycznego nacisku można oceniać jedynie metodami statystycznymi. Bogatszą informację nt. statystycznych właściwości błędów ważenia w porównaniu z odchyleniem standardowym (12) daje charakterystyka (16). 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. Podstawę wyznaczenia charakterystyki (16) stanowią 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. Charakterystyka (16) jest szczególnie użyteczna do oceny właściwości projektowanego bądź istniejącego stanowiska MS-WIM.

$$\Pr(\delta p) = 1 - F(\delta p) \quad (16)$$

gdzie:

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

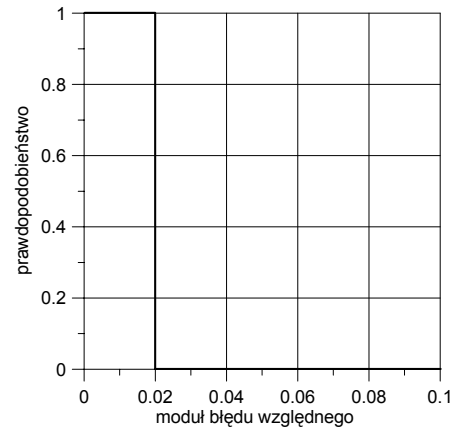
\bar{P} - ocena składowej statycznej nacisku,

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

wyników estymacji uzyskanych dla strumienia pojazdów,

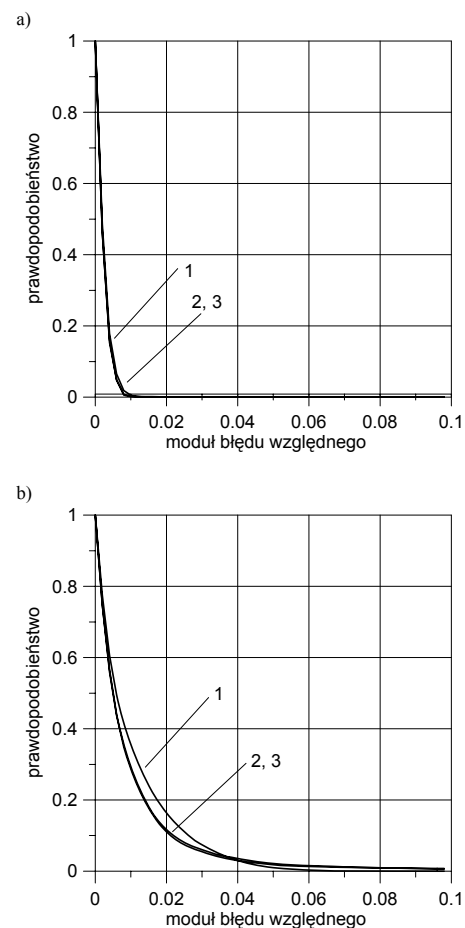
$\Pr[\cdot]$ - prawdopodobieństwo.

Charakterystyka określona zależnością (16) wyznaczona dla stanowiska MS-WIM, na którym wszystkie pojazdy są ważone z jednokrotnym błędem równym 2%, miałyby postać jak na rysunku 13.



Rys. 13. Charakterystyka niezawodności systemu MS-WIM, na którym wszystkie pojazdy są ważone z jednakowym błędem δp równym 2%

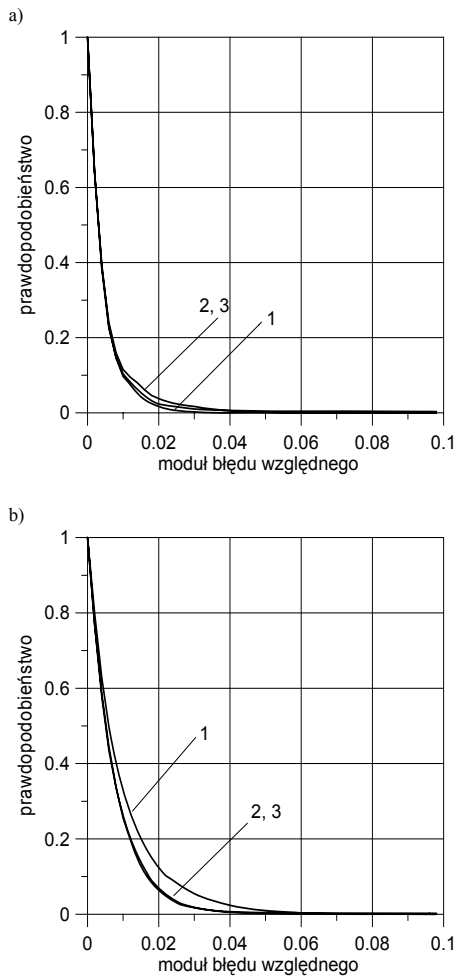
Fig. 13. Reliability characteristic of the WIM system, in case when all vehicles are weighted with the same error δp equal to 2%



Rys. 14. Charakterystyki niezawodności systemu MS-WIM ($n = 16$, $\Delta = 0.7m$) w przypadku ograniczenia prędkości ważonych pojazdów do 20 km/h (rysunek a) oraz do 80 km/h (rysunek b). Poszczególne charakterystyki odpowiadają różnym algorytmom estymacji nacisku statycznego: klasyczne uśrednianie (krzywa 1), algorytm największej wiarygodności (krzywa 2), połączenie algorytmu największej wiarygodności z nieliniowym algorytmem najmniejszych kwadratów (krzywa 3)

Fig. 14. Reliability characteristic of the WIM system ($n = 16$, $\Delta = 0.7m$), in case when velocity of the weighed vehicles is limited to 20 km/h (Figure a) and to 80 km/h (Figure b) respectively. These characteristics correspond to different algorithms of static load estimation: mean value of the measurement results of separate sensors (curve 1), maximum likelihood estimator (curve 2), joined maximum likelihood and nonlinear least square estimators

Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono charakterystyki niezawodności stanowiska MS-WIM wyposażonego w $n=16$ czujników nacisku, rozmieszczonych w równych odległościach wynoszących odpowiednio $\Delta=0.7m$ (rys. 14) oraz $\Delta=1.0m$ (rys. 15), dla trzech porównywanych algorytmów estymacji, którymi są: algorytm wyliczenia średniej (2), algorytm największej wiarygodności (ML) oraz połączenie algorytmu największej wiarygodności z nieliniowym algorytmem najmniejszych kwadratów [4, 5, 6, 7]. Badania symulacyjne przeprowadzono na modelu typu „quarter”.



Rys. 15. Charakterystyki niezawodności systemu MS-WIM ($n=16$, $\Delta=1.0m$) w przypadku ograniczenia prędkości ważonych pojazdów do 20 km/h (rysunek a) oraz do 80 km/h (rysunek b). Poszczególne charakterystyki odpowiadają różnym algorytmom estymacji nacisku statycznego: klasyczne uśrednianie (krzywa 1), algorytm największej wiarygodności (krzywa 2), połączenie algorytmu największej wiarygodności z nieliniowym algorytmem najmniejszych kwadratów (krzywa 3)

Fig. 15. Reliability characteristic of the WIM system ($n=16$, $\Delta=1.0m$), in case when velocity of the weighed vehicles is limited to 20 km/h (Figure a) and to 80 km/h (Figure b) respectively. These characteristics correspond to different algorithms of static load estimation: mean value of the measurement results of separate sensors (curve 1), maximum likelihood estimator (curve 2), joined maximum likelihood and nonlinear least square estimators

Dokładniejsze wyniki można uzyskać posługując się bardziej zaawansowanymi algorytmami estymacji nacisku statycznego. Zmiana odległości pomiędzy czujnikami (w wymienionym zakresie) powoduje niewielką poprawę jakości stanowiska MS-WIM – lepsze jest stanowisko, dla którego $\Delta=1.0m$, a prędkość ważonych pojazdów jest ograniczona do 80 km/h. Istotny wpływ ma

natomiast maksymalna prędkość ważonych pojazdów. Jej ograniczenie do 20 km/h pozwala na stanowisku MS-WIM o parametrach $n=16$, $\Delta=0.7m$ ważyć pojazdy z błędem nie przekraczającym 1% (rys. 14a).

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono modele matematyczne najbardziej istotnych elementów systemu MS-WIM, jakimi są: stanowisko pomiarowe wyposażone w wiele czujników nacisku, nawierzchnia drogi oraz mechaniczne właściwości ważonego pojazdu. Potwierdzono wiarygodność zarówno przedstawionych modeli matematycznych, jak też zbudowanych na ich podstawie modeli symulacyjnych. Przedstawione modele oraz zastosowana metoda badań symulacyjnych pozwalają na efektywne projektowanie systemu MS-WIM. Rozbudowanie biblioteki modeli opisujących mechaniczne właściwości ważonych pojazdów pozwoli na poszerzenie zakresu badań symulacyjnych i uzupełnienie ich o analogiczne badania dla innych klas pojazdów. Przedmiotem dalszych badań będą również przypadki wyymykające się analizie analitycznej. Przykładem takiego przypadku jest stanowisko MS-WIM o nierównomiernym rozłożeniu czujników nacisku z różnymi postaciami tej nierównomierności.

Uzyskane wyniki wskazują, że istnieje możliwość zbudowania systemu MS-WIM o liczbie czujników nacisku ograniczonej do $n=16$, dla którego błąd ważenia pojazdów nie będzie przekraczał 2%. Wydaje się również, że implementacja złożonych algorytmów nacisku pozwoli na dalsze zmniejszenie wartości tego błędu.

Praca została sfinansowana w ramach projektu badawczego nr 4 T10C 026 25 MNiSzW.

7. Literatura

- [1] Cebon D.; „Multiple-sensor Weigh-in-Motion”, w “Weigh-in-Motion of Road Vehicles”, ed. Jacob B., Hermes Science Publications, 1999r
- [2] Cebon D.; „Handbook of Vehicle – Road Interaction”, Swets & Zeitlinger Publishers, Holandia, 1999r.
- [3] Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T.; „Wybrane zagadnienia projektowania wieloczuJNIKOWYCH SYSTEMÓW WIM”, materiały Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Krynica, 2005r.
- [4] Mangeas M., Glaser S., Dolcemascolo V.; Neural Networks Estimation of Truck Static Weights by Fusing Wweight-In-Motion Data. Proceedings of Eurofusion 2000.
- [5] Gonzales A., Papagiannakis A.T., O’Brien E.; Evaluation of an Artificial Neural Network Technique Applied to Multiple Sensor Weigh-in-Motion Systems. University College Dublin, Ireland.
- [6] Cebon D.; Weigh-in-motion of Road Vehicles for Europe (WAVE) – Report of Work Package 1.1 – Multiple sensor WIM. May 2001.
- [7] Gajda J., Sroka R.; „Pomiary i przetwarzanie sygnałów w systemach monitoringu ruchu drogowego”, w materiałach Sympozjum Perspektywy i prognozy rozwojowe badań na styku Automatyki i Metrologii, Szczecin, 2005r.