

Piotr BURNOS,
AGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA METROLOGII i ELEKTRONIKI
{burnos@agh.edu.pl}

© Ten utwór jest dostępny na licencji Creative Commons
Uznanie autorstwa - Użycie niekomercyjne 4.0
Międzynarodowe. Pewne prawa zastrzeżone na rzecz
autorów. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/pl/>

Analiza niestacjonarności systemów WIM¹

Streszczenie

W pracy opisano metodę wyznaczania wpływu czynników zakłócających na parametry systemu WIM. Rozważono zmiany temperatury otoczenia oraz wilgotności jako główne przyczyny niestacjonarności systemu. Przedstawiono schemat badań symulacyjnych oraz wyniki pochodzące z systemu ważącego zainstalowanego na drodze nr 1 w miejscowości Gardawice.

Abstract

The paper presents the identification method of factors affecting WIM systems accuracy. Air temperature and humidity are considered as main reasons of nonstationarity. The idea of the numerical simulation has been shown as well as data analysis from WIM site at road number 1 in Gardawice.

Słowa kluczowe: Dokładność systemów WIM, ważenie pojazdów.

Keywords: WIM system accuracy, weigh in motion.

Title: Analysis of the nonstationary WIM systems.

1. Wstęp

Praca dotyczy wyznaczenia wpływu czynników zakłócających na wyniki pomiarowe uzyskiwane z systemów ważących pojazdy samochodowe, które poruszają się z prędkościami drogowymi. Takie systemy pomiarowe są nazywane w skrócie WIM od angielskojęzycznej nazwy *Weigh In Motion*. Podstawowym elementem systemów WIM są czujniki nacisku, montowane w nawierzchni lub pod nawierzchnią jezdni prostopadle do kierunku ruchu, w taki sposób, że poszczególne osie ważonego pojazdu przetaczają się kolejno przez te czujniki. Wykorzystuje się różne rodzaje czujników nacisku, jednak do najpopularniejszych należy zaliczyć: kwarcowe, pojemnościowe oraz piezoelektryczne. Czujniki kwarcowe mają najlepsze właściwości z punktu widzenia omawianego zastosowania. Odpowiednia konstrukcja i montaż czujnika w nawierzchni zapewniają bezpośredni kontakt opony pojazdu z przetwornikiem. Dzięki temu uzyskuje się minimalizację czułości poprzecznej oraz wyeliminowanie dodatkowych elementów pośredniczących w przenoszeniu nacisku. Ponadto czujniki te charakteryzują się małą wrażliwością na wpływ temperatury, dobrą liniowością

oraz niestety wysoką ceną co ogranicza ich zastosowanie. Czujniki pojemnościowe budowane są w postaci platform o szerokości około 50 cm również montowanych w nawierzchni jezdni, a ich właściwości są zbliżone do czujników kwarcowych. Wadą tego typu stanowisk ważących jest mała wytrzymałość mechaniczna. Trzecią grupę stanowią taśmowe czujniki piezoelektryczne umieszczane pod nawierzchnią jezdni, która pośredniczy w przenoszeniu nacisku na czujnik. Charakteryzują się dużą wrażliwością na zmiany temperatury, reagują na siły poprzeczne, oraz nie przenoszą sił stałych w czasie co znacznie utrudnia kalibrację stanowiska [1]. Wady te kompensuje jednak niska cena, co decyduje o ich szerokim zastosowaniu.

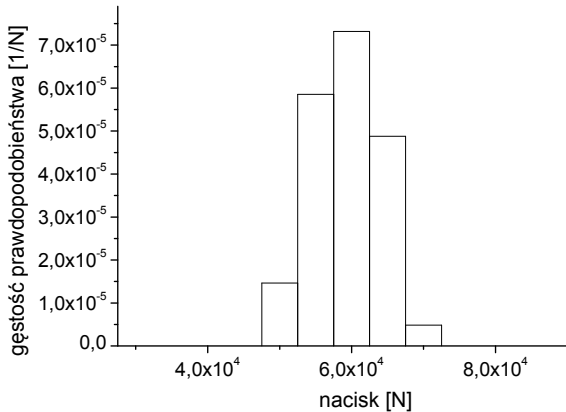
W Katedrze Metrologii AGH zbudowano kilka stanowisk WIM. Problem identyfikacji czynników mających wpływ na wynik ważenia, pierwszy raz pojawił się podczas analizy danych pomiarowych pochodzących ze stanowiska WIM z dwoma czujnikami piezoelektrycznymi zainstalowanego w Woli Dębińskiej. Stwierdzono iż wyniki ważenia silnie zależą od czynników atmosferycznych takich jak temperatura i wilgotność powietrza. Jednak ze względu na brak wystarczającej ilości danych oraz techniczną degradację stanowiska, przeprowadzenie dokładnej analizy nie było możliwe. Badania wznowiono pod koniec 2005 roku po zakończeniu budowy nowego stanowiska ważącego w miejscowości Gardawice, na drodze nr 1 pomiędzy Katowicami a Cieszynem. Zgromadzone dane pomiarowe pochodziły z dwóch czujników piezoelektrycznych i jednego czujnika indukcyjnego. Sygnały z czujników były przetwarzane przez specjalnie do tego celu zaprojektowany system pomiarowy, który współpracował z komputerem klasy PC. Dla każdego pojazdu rejestrowano godzinę przejazdu, prędkość, naciski poszczególnych osi, ich liczbę oraz odległości między nimi, temperaturę asfaltu, wilgotność i temperaturę powietrza w chwili przejazdu. Pomiarów dokonano w okresie od listopada 2005 do stycznia 2006 roku. Zgromadzone dane przyniosły wielu cennych informacji na temat wybranych parametrów ruchu drogowego, właściwości samych pojazdów przejeżdżających przez stanowisko oraz właściwości systemu WIM.

2. Analiza danych pomiarowych

Analizując uzyskane dane pomiarowe pod kątem stacjonarności systemu i dokładności wyników ważenia, należało posłużyć się wzorcem stanowiącym wielkość odniesienia. Pięciosiowe samochody ciężarowe zawierające dwuosiowy ciągnik siodłowy oraz trójosiową naczepę stanowią charakterystyczną grupę pojazdów poruszających się po naszych drogach. Wyróżnia je

¹ Wykonano w ramach projektu nr: 4T10C2625

rozmieszczenie trzech osi naczepy we wzajemnych odległościach równych 1310 mm, co znacznie ułatwia ich detekcje, oraz mała losowa zmienność nacisku pierwszej osi, której wartość średnia jest równa 61677 [N] i może służyć za wielkość odniesienia podczas oceny stacjonarności i dokładności systemu. Pojazdy takie będą dalej nazywane pojazdami odniesienia.



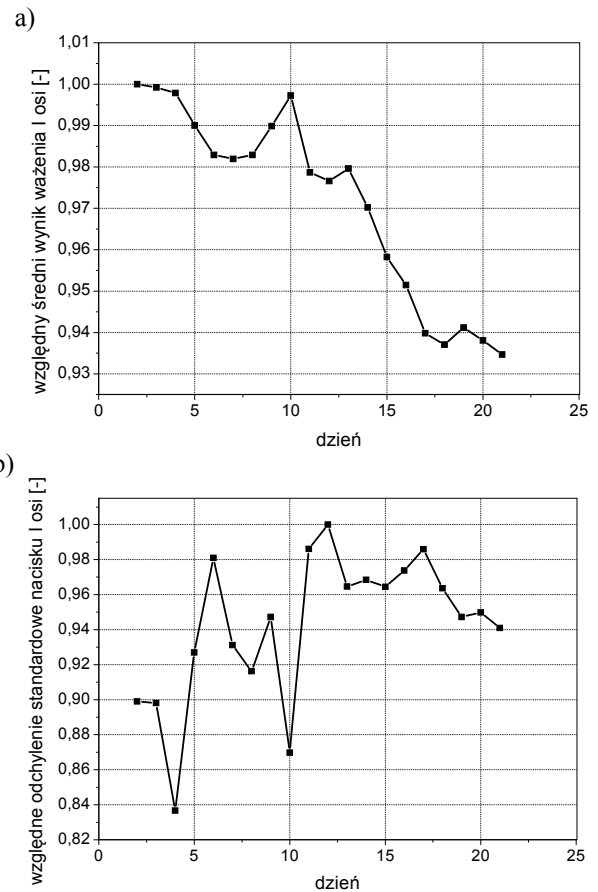
Rys. 1. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa nacisku pierwszej osi pojazdów pięcioosiowych

Na rysunku 1 przedstawiono ocenę rozkładu gęstości prawdopodobieństwa, charakteryzującą zmienność wyników ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia na wolno-przejazdowej wadze administracyjnej. Tabela 1 zawiera parametry statystyczne opisujące ten rozkład.

Tabela 1.

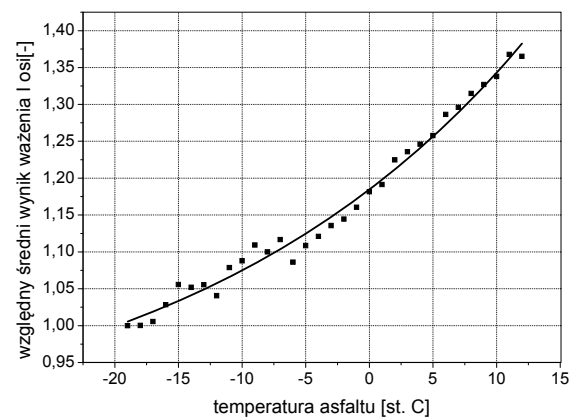
Numer osi	Wartość średnia	Względne odchylenie standardowe
1	61 677 [N]	0.073

Analizując wyniki ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia pochodzące z badanego systemu WIM, stwierdzono zmiany wyżej wymienionej wartości średniej oraz odchylenia standardowego w kolejnych okresach 24 – godzinnych. Na rysunku 2 przedstawiono tę zmienność dla danych pochodzących z listopada 2005 roku. Na przestrzeni 20 dni zaobserwowano niemal 10% 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 pomiarowy. W systemach z czujnikami piezoelektrycznymi przenoszenie sygnału pomiarowego przez nawierzchnię jezdni powoduje, że wyniki ważenia są bardzo wrażliwe na zmiany jej parametrów [2]. Asfalt jest lepszem, którego właściwości fizyko-mechaniczne są funkcją temperatury i czasu obciążenia. Wraz ze zmianą tych wielkości zmienia się przede wszystkim konsystencja asfaltu charakteryzowana przez lepkość i sprężystość [3]. Zależnie od rodzaju, temperatury i obciążenia, asfalt może znajdować się w stanie: lepkiem, lepko-sprężystym i sprężystym przy czym najistotniejszy dla właściwości eksploatacyjnych jest stan lepko-sprężysty.



Rys. 2. Zmienność parametrów statystycznych w czasie.

W Polsce zakres temperatur eksploatacyjnych określono od około -40°C do 70°C (najwyższa temperatura jaką może osiągnąć nawierzchnia przy temperaturze powietrza 40°C). Tak znaczna zmiana temperatur w cyklu rocznym, a w mniejszym zakresie w cyklu dobowym, powoduje istotne zmiany konsystencji asfaltu, co ma niewątpliwie wpływ na wynik ważenia. Zjawisko to obrazuje charakterystyka z rysunku 3, ukazująca wpływ zmiany temperatury asfaltu na wynik ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia w okresie od listopada 2005 do stycznia 2006. Wynik ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia zmienił się aż o 40% przy zmianie temperatury asfaltu o zaledwie 30°C .



Rys. 3. Zmiana wyników ważenia w funkcji temperatury asfaltu.

Pozostałe czynniki mogące wpływać niekorzystnie na jakość ważenia są związane z analogowym układem kondycjonowania sygnału z czujników nacisku. Pomimo zastosowania wysokiej jakości elementów elektronicznych, nie można wykluczyć pewnej wrażliwości na wahania temperatury zewnętrznej, która może mieć wpływ na punkt pracy członów wzmacniających. Ze względu na specyfikę budowy, nie można również pominąć niekorzystnego wpływu wilgotności na zmianę rezystancji wejściowej układu.

Na podstawie powyższych przesłanek postawiono hipotezę, iż istnieją czynniki zewnętrzne takie jak temperatura asfaltu, temperatura aparatury pomiarowej oraz wilgotność powietrza, które mogą mieć wpływ na otrzymywane wyniki ważenia. Przeprowadzone badania dotyczyły wyznaczenia modelu wpływu powyższych czynników.

Analiza danych pomiarowych wskazuje na istotną niestacjonarność systemu WIM. Miarą tej niestacjonarności może być zakres zmian współczynnika kalibracji C , zdefiniowanego jako:

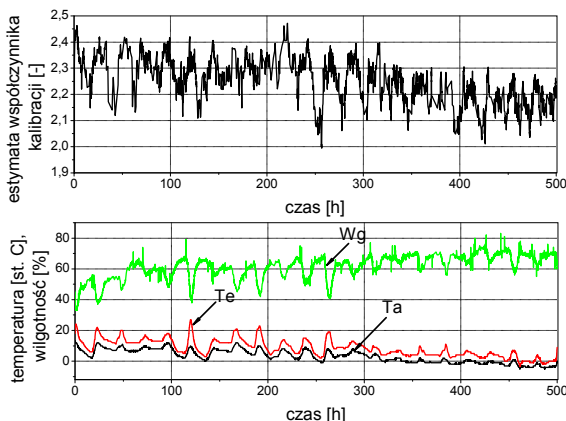
$$W_s = \frac{1}{C} \cdot W_d \quad (1)$$

gdzie:

W_s - skalibrowany wynik ważenia tj. masa całkowita pojazdu lub nacisk statyczny wybranej osi,

W_d - nie kalibrowany wynik ważenia tj. wynik przetwarzania sygnału nacisku z czujników systemu WIM.

W tym rozumieniu C należy interpretować jako współczynnik liczbowy, przez który trzeba pomnożyć uzyskane z układu pomiarowego dane, aby otrzymać ocenę statycznego nacisku osi pojazdu na podłoże lub masę całkowitą wyrażoną w kilogramach. Z wymienionych wcześniej powodów wartość współczynnika C nie jest stała i zależy od właściwości systemu ważącego w chwili pomiaru. Parametr ten jest zatem miarą wpływu czynników zewnętrznych na właściwości systemu ważącego i odgrywa istotną rolę w autokalibracji systemów WIM [4]. Ciągła estymacja współczynnika kalibracji umożliwia śledzenie „stanu” systemu ważącego i analizę wpływu czynników zewnętrznych na ten stan. Do estymacji wykorzystano iteracyjny zmodyfikowany algorytm LS, wchodzący w skład procedury autokalibracji.



Rys. 4. Estymata współczynnika C i odpowiadająca jej zmienność rejestrowanych temperatur oraz wilgotności.

Na rysunku 4 przedstawiono wynik estymacji współczynnika C oraz zarejestrowane przebiegi temperatury asfaltu - T_a , wilgotności - W_g i temperatury aparatury pomiarowej - T_e , systemu WIM zainstalowanego w miejscowości Gardawice. Pomiary przeprowadzono w listopadzie 2005 roku.

Miarą podobieństwa zmian współczynnika kalibracji i obserwowanych przebiegów wielkości wpływowych jest współczynnik korelacji między tymi wielkościami (2). Współczynnik ten przyjmuje wartości z przedziału $[-1; 1]$, przy czym wartość 1 oznacza pełną korelację, a 0 jej całkowity brak.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

gdzie:

x_i, y_i - skorelowane sygnały,

\bar{x}, \bar{y} - wartości średnie x_i, y_i .

Uzyskane wartości współczynnika (2) zestawiono w tabeli:

Tabela 2. Współczynniki korelacji.

	\hat{C}	T_a	T_e	W_g
\hat{C}	1.00	0.70	0.66	-0.61
T_a	0.70	1.00	0.94	-0.78
T_e	0.66	0.94	1.00	-0.85
W_g	-0.61	-0.78	-0.85	1.00

gdzie: \hat{C} - estymata współczynnika kalibracji.

Znacząca korelacja pomiędzy współczynnikiem kalibracji a temperaturą asfaltu wskazuje na istotny wpływ tej wielkości na wynik ważenia. Również temperatura aparatury pomiarowej i wilgotność wykazują pewną korelację z estymatą \hat{C} . Ujemne wartości zawarte w tabeli sugerują odwrotnie proporcjonalną zależność między badanymi przebiegami, a korelacja pomiędzy temperaturą asfaltu a temperaturą aparatury wynosi 0.9437, co wskazuje na niemal pełną zależność tych wielkości. Ze względu na silną korelację pomiędzy wszystkimi badanymi przebiegami, jednoznaczne wyznaczenie wpływu poszczególnych czynników na właściwości systemu pomiarowego, a w konsekwencji na wynik ważenia, nie było możliwe. Określenie tego wpływu wymagało zaprojektowania i przeprowadzenia bardziej złożonego eksperymentu. Pierwszym krokiem do osiągnięcia tego celu było zbudowanie modeli czynników wpływowych oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych.

3. Badania symulacyjne

Celem badań symulacyjnych była weryfikacja zaproponowanej metody identyfikacji wpływu czynników zewnętrznych na parametry systemu WIM. Podstawą przeprowadzonych badań był zbiór 5 tys. liczb, otrzymanych za pomocą generatora liczb pseudolosowych oraz modele zmienności temperatury asfaltu, aparatury pomiarowej oraz wilgotności powietrza. Zbiór liczb pseudolosowych symulował rzeczywiste wartości wielkości mierzonej (tj. nacisk pierwszej osi), o rozkładzie normalnym i parametrach statystycznych zaczerpniętych z tabeli 1 dla pierwszej osi pojazdów odniesienia, które po przejściu przez model systemu WIM, stanowiły podstawę dalszych badań symulacyjnych. Model systemu musiał uwzględniać jego niestacjonarność, co osiągnięto poprzez uzależnienie wartości współczynnika kalibracji od T_a , T_e i W_g , a także wpływ innych, dobrze znanych czynników zakłócających nieodłącznie związanych z procesem ważenia pojazdów w ruchu.

Jedną z głównych przyczyn niedokładności systemów WIM wynika stąd, iż ważenie polega na estymacji statycznego nacisku osi na podłoże (lub masy całkowitej) na podstawie dynamicznych oddziaływań samochód – droga. Na tak rozumiany pomiar mają wpływ inne, niezależne od warunków atmosferycznych czynniki, które należy uznać za zakłócające [5]. Można je podzielić na cztery główne grupy tj.: zależne od konstrukcji pojazdu, zależne od jakości nawierzchni, zależne od środowiska i od parametrów systemu. W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych model niestacjonarności uzupełniono o czynnik związany z pionowymi wahaniami pojazdu przejeżdżającego przez stanowisko wążące. Decydującą przyczyną powstawania tych wahań jest zła jakość nawierzchni oraz gwałtowne podmuchy wiatru. Ocenia się, iż czynnik ten jest źródłem błędów pomiaru sięgających nawet 40 procent, przy zastosowaniu jednego czujnika nacisku w systemie. Stąd badania symulacyjne przeprowadzono w oparciu o następujący model odniesienia reprezentujący analizowany system WIM:

$$\begin{aligned} W_d &= m_{\text{niest}} \cdot \text{nacisk} + m_{\text{wahań}} \cdot \text{nacisk} = \\ &= C(T_a, T_e, W_g) \cdot \text{nacisk} + z \cdot \text{dev} \cdot \text{nacisk} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

m_{niest} – model niestacjonarności systemu,
 $m_{\text{wahań}}$ – model pionowych wahań pojazdu,
 nacisk – nacisk wywierany przez wybraną oś pojazdu na podłoże podczas przejazdu przez stanowisko WIM,
 C – zadana wartość współczynnika kalibracji systemu WIM, będąca funkcją:

T_a – temperatury asfaltu,
 T_e – temperatury elektroniki (aparatury pom.),
 W_g – wilgotności powietrza.

z – składowa losowa o rozkładzie równomiernym z przedziału $[-0.5 \div 0.5]$,

dev – parametr określający względną (odniesioną do nacisku) zmienność nacisku osi w wyniku pionowych wahań pojazdu.

Pierwszy wyraz (3) jest modelem wpływu T_a , T_e i W_g na wynik ważenia, drugi uwzględnia błędy związane z pionowymi wahaniami pojazdu. Przyjęto iż wpływ czynników atmosferycznych na wynik ma charakter addytywny, a tym samym model niestacjonarności – C przyjęto w postaci (4).

$$C(T_a, T_e, W_g) = C_1(T_a) + C_2(T_e) + C_3(W_g) \quad (4)$$

Do celów badań symulacyjnych określono następujące postacie zmienności C_1 , C_2 i C_3 :

$$C_1(T_a) = k_1 \cdot 10^{w_1(T_0 - T_a)} \quad (5a)$$

$$C_2(T_e) = k_2 \cdot T_e \quad (5b)$$

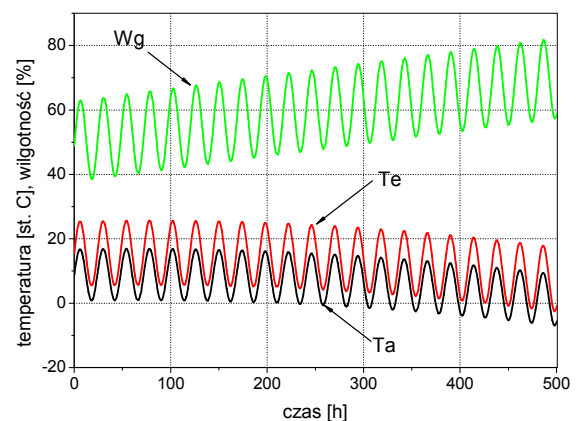
$$C_3(W_g) = \frac{k_3}{W_g} \quad (5c)$$

gdzie:

k_1, k_2, k_3 – współczynniki wzmocnienia,
 w_1 – współczynnik nachylenia krzywej,
 T_0 – temperatura odniesienia.

Postać zmienności C_2 i C_3 przyjęto w sposób arbitralny, sugerując się jedynie wynikiem analizy korelacyjnej. Natomiast model C_1 to znana w literaturze [6] zależność określająca wpływ temperatury nawierzchni asfaltowej na jej sztywność (konsystencję), a pośrednio na wynik ważenia. Współczynnik w_1 jest zależny od rodzaju oraz składu asfaltu i przyjmuje wartości ujemne. Oznacza to że wraz ze wzrostem temperatury sztywność nawierzchni maleje. Na podstawie (5a) można obliczyć o ile zmieniła się sztywność asfaltu jeżeli jego temperatura zmieniła się od T_0 do T_a .

Wykorzystując zależności (3), (4) i (5) oraz modele zmienności T_a , T_e i W_g (rys. 5), wyznaczono odpowiedź W_d modelu odniesienia o znanych parametrach, a następnie na tej podstawie z wykorzystaniem zmodyfikowanego algorytmu LS, wyznaczono ocenę zmienności współczynnika kalibracji (4) ukazaną na rysunku 6-a.



Rys. 5. Modele zmienności czynników atmosferycznych

Do tak skonstruowanego modelu odniesienia należało następnie dopasować w procesie identyfikacji model wyznaczany (6):

$$Wd_m = C_m(T_a, T_e, W_g) * nacisk_m \quad (6)$$

Zaproponowana metoda identyfikacji wykorzystuje do „pobudzenia” modelu wyznaczanego przebiegi T_a , T_e i W_g z modelu odniesienia oraz znajomość rozkładu nacisku I osi pojazdów odniesienia. Wynikiem jest estymata współczynnika kalibracji \hat{C}_m modelu wyznaczanego. Otrzymane estymaty, z modelu odniesienia oraz zmienność C modelu wyznaczanego (rys. 6-b), posłużyły następnie do sformułowania kryterium będącego miarą dopasowania modelu wyznaczanego:

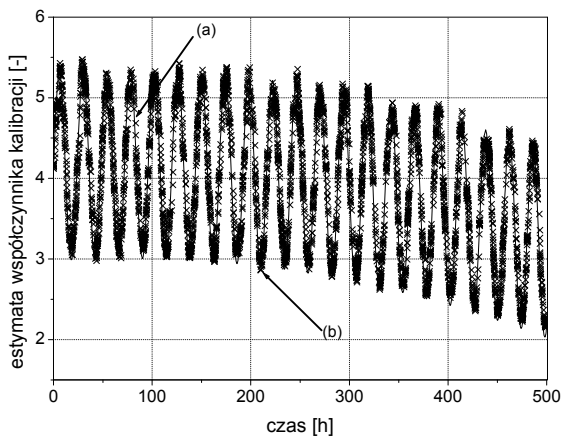
$$Q = \sum_{i=1}^N (C - \hat{C}_m)^2 \quad (7)$$

gdzie:

C – współczynnik kalibracji założony w modelu odniesienia,

\hat{C}_m – estymata współczynnika kalibracji modelu wyznaczanego.

Testowany algorytm identyfikacji zbiegał się do założonych w modelu odniesienia wartości współczynników charakteryzujących zmienność (5a - 5c), co świadczy o znalezieniu globalnego minimum kryterium (7).



Rys. 6. Zadana zmienność C modelu odniesienia (a), oraz estymata \hat{C}_m modelu wyznaczanego (b).

Współczynnik korelacji obliczony dla współczynnika kalibracji modelu odniesienia oraz estymaty pochodzącej z modelu wyznaczanego jest bardzo wysoki i wynosi 0.98. Badania symulacyjne potwierdziły możliwość jakościowej i ilościowej identyfikacji czynników mających wpływ na wynik ważenia.

4. Model systemu WIM

Powyższą metodę identyfikacji wykorzystano w celu wyznaczenia modelu systemu WIM zainstalowanego w miejscowości Gardawice. Na podstawie rejestracji

temperatury asfaltu, aparatury pomiarowej, wilgotności powietrza oraz wykorzystując estymatę współczynnika kalibracji przeprowadzono eksperyment identyfikacji. Sprawdzone różne postacie modeli niestacjonarności, od najprostszyc tak jak w badaniach symulacyjnych, do bardziej złożonych uwzględniających zmiany wielu parametrów systemu. Niezależnie od kształtu modelu (6), eksperyment prowadził do wyniku uwzględniającego jedynie wpływ temperatury asfaltu. Model, który najlepiej opisuje ten wpływ ma postać:

$$C_m(T_a, T_e, W_g) = C_{m1}(T_a) = k_1 \cdot 10^{w_1(T_0 - T_a)} \quad (8)$$

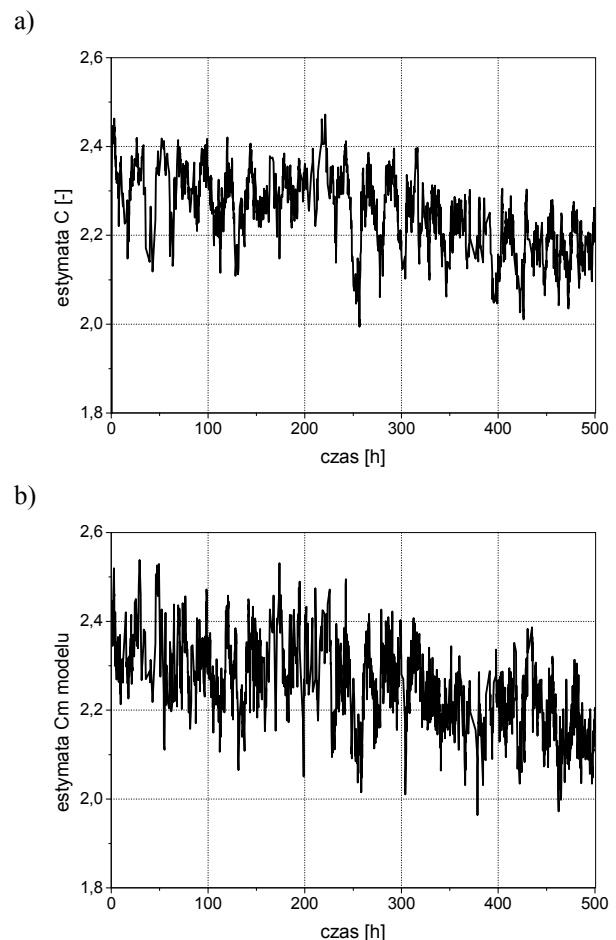
gdzie:

$k_1=3.8702$ – współczynnik wzmocnienia,

$w_1=-0.0053$ – współczynnik nachylenia krzywej,

$T_0=45$ – temperatura odniesienia.

Na uwagę zasługuje fakt braku w (8) czynników związanych z temperaturą aparatury pomiarowej oraz wilgotnością, co wskazuje na znikomy wpływ tych wielkości na system pomiarowy, a tym samym na wynik ważenia. Na rysunku (7) przedstawiono estymatę współczynnika kalibracji systemu WIM oraz estymatę współczynnika kalibracji modelu wyznaczanego w procesie identyfikacji:



Rys. 7. Estymata zmienności współczynnika kalibracji systemu (a), oraz modelu (b) dla systemu WIM z Gardawic.

Współczynnik korelacji obliczony wg (2) dla powyższych przebiegów wynosi 0.6602, co wskazuje na dobre dopasowanie modelu. Zależność (8) można wykorzystać do kompensacji wpływu temperatury asfaltu na otrzymywane wyniki ważenia. W połączeniu z procedurą autokalibracji może stanowić skuteczne narzędzie do znacznego zwiększenia dokładności ważenia.

5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań są istotnym krokiem na drodze do dokładnego poznania właściwości systemów ważących z zastosowaniem czujników piezoelektrycznych. W wyniku przeprowadzonych symulacji wyłoniono wiarygodną metodę identyfikacji parametrów systemu WIM. Na tej podstawie określono ilościowy wpływ czynników atmosferycznych na wyniki ważenia. W sposób empiryczny potwierdzono hipotezę o wrażliwości systemu WIM na zmiany temperatury asfaltu. Jednocześnie stwierdzono pomijalny wpływ temperatury otoczenia oraz wilgotności powietrza na właściwości aparatury pomiarowej.

6. LITERATURA

- [1] J. Gajda, R. Sroka, M. Stencel, A. Wajda, T. Żegleń, „Systemy ważenia pojazdów samochodowych w ruchu”, *Drogownictwo*, 3/2001, str. 78-81.
- [2] *Final Report of Project COST 323 on Weigh-in-Motion of Road Vehicles*, Ver. 3.0, 1999.
- [3] I. Gawel, M. Kalabińska, J. Piłat, „*Asfalty Drogowe*”, Wydaw. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2001
- [4] P. Burnos, J. Gajda, „*Autokalibracja Systemów Ważenia Pojazdów Samochodowych w Ruchu*”, *Materiały XV Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych*, Krynica, wrzesień 2005, str. 123-132.
- [5] 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.
- [6] E. Lukanen, R. Stubstad, R. Briggs, “*Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement*”, *Final Report of LTPP, Federal Highway Administration* 06/2000.