

## Janusz GAJDA, Ryszard SROKA

KATEDRA METROLOGII, AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE

# WieloczuJNIKOWA fuzja danych w systemach ważenia pojazdów 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, wypromował 3 doktorów. Członek Komitetu Metrologii i AN PAN, redaktor działu metrologia w PAK.



e-mail: jgajda@agh.edu.pl

### Dr inż. Ryszard SROKA

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki AGH w 1989 r. Obecnie 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

### Streszczenie

Praca dotyczy zagadnień pomiaru parametrów ruchu drogowego przy użyciu wieloczuJNIKOWYCH systemów realizujących złożone algorytmy przetwarzania danych pomiarowych. Cechą charakterystyczną omawianych systemów i algorytmów jest wykorzystanie w nich różnych typów czujników oraz metod fuzji danych. Stwarza to możliwość łączenia różnorodnej wiedzy pomiarowej z wiedzą wstępną posiadaną na temat obiektu pomiarowego. Autorzy wykazali, że metody te pozwalają zmniejszyć niepewność wyniku pomiaru, zwiększyć jego rozdzielczość lub ograniczyć wpływ czynników zakłócających.

**Słowa kluczowe:** fuzja danych, ważenie w ruchu, systemy MS-WIM

## Multisensor Data Fusion in Weigh-In-Motion Systems

### Abstract

The problem of road traffic parameters measurement using multisensor systems with complex algorithms of data processing is discussed in the paper. A characteristic feature of these systems is using different types of sensors and utilising data fusion methods. In this way a possibility of linking the diverse experimental data with an a priori knowledge concerning the measurement object has been created. The authors have shown that these methods allow to decrease measurement uncertainty, increase measurement reliability or to limit the influence of the disturbing factors.

**Keywords:** Data Fusion, Weigh-In-Motion, MS-WIM Systems

## 1. Wstęp

Każdy proces poznawczy wiąże się z przetwarzaniem informacji. Informacja może pochodzić z różnych źródeł, a jednym z nich jest eksperyment pomiarowy. Jakość procesu poznawczego jest uzależniona od ilości i jakości informacji pozyskanej z obiektu pomiarów, zasobów wiedzy a priori posiadanej na temat tego obiektu oraz jakości procesu przetwarzania. Niezależnie od przedmiotu pomiarów i celu procesu poznawczego, obowiązuje podstawowa zasada mówiąca, że im bogatsza i bardziej kompletna informacja zostanie pozyskana z obiektu, tym bardziej wiarygodne będą efekty procesu poznawczego.

Wzbogacanie informacji pomiarowej pozyskiwanej z obiektu można uzyskać nie tylko poprzez podnoszenie dokładności pomiaru (co często jest trudne lub niemożliwe na poziomie użytkownika sprzętu pomiarowego), ale również poprzez pomiar większej liczby odpowiednio dobranych zmiennych obiektu. Wzbogacanie to, może również oznaczać poszerzenie wiedzy teoretycznej posiadanej a priori o obiekcie pomiarów. Na etapie przetwarzania informacji, możliwe jest połączenie wiedzy

pomiarowej (eksperymentalnej) z wiedzą posiadaną a priori, co może znacząco zwiększyć efektywność procesu poznawczego. Łączenie wiedzy pochodzącej z różnych źródeł nazywane jest fuzją danych.

Pod pojęciem **fuzji danych** rozumie się wszelkie formalne metody umożliwiające łączenie i przetwarzanie wiedzy o badanym obiekcie lub zjawisku, pochodzącej z wielu różnych źródeł, w celu zmniejszenia niepewności końcowego wyniku pomiaru, zwiększenia efektywności klasyfikacji, polepszenia jakości identyfikacji lub diagnostyki [1, 2]. Fuzja danych jest więc takim sposobem działania, za pomocą którego duża liczba danych (często bardzo zróżnicowanych), pochodzących z różnych źródeł może być połączona w spójną, dokładną i zrozumiałą całość. Fuzja, w zależności od rodzaju posiadanej wiedzy i struktury systemu, w którym się odbywa, może być realizowana na poziomie danych nieprzetworzonych, cech lub decyzji. W zależności zaś od celu, dla którego jest prowadzona, może być fuzją współpracy, współzawodnictwa lub fuzją uzupełniającą.

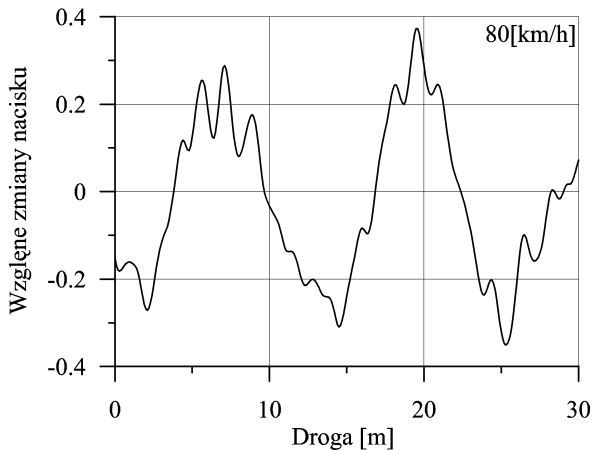
Jednym z obszarów, w którym ostatnio rozwijane i wdrażane są metody oraz algorytmy fuzji danych jest inżynieria ruchu drogowego [3] i centralny system monitoringu tego ruchu. Algorytmy przetwarzania stosowane na wyższych poziomach tego systemu bazują zazwyczaj na danych zagregowanych. Najniższą jego warstwę i podstawowe źródło informacji dotyczącej pojedynczych pojazdów, biorących udział w ruchu drogowym, stanowią systemy ważenia pojazdów w ruchu (ang. *WIM – Weigh in Motion*). Jednym z warunków uzyskania wysokiej jakości wyników przetwarzania na wyższych poziomach jest dostarczenie jak najlepszych danych wejściowych. W celu pozyskania takich danych zaproponowano zastosowanie metod fuzji danych również w obszarze układów i systemów pomiarowych. Celem fuzji danych w tym zakresie jest zarówno zapewnienie kompletności opisu badanego obiektu, jak również zapewnienie możliwie wysokiej dokładności uzyskiwanych wyników pomiaru i estymowanych na ich podstawie parametrów i charakterystyk. Zagadnienia związane z fuzją danych realizowaną na tym poziomie, przedstawiono w pracy na przykładzie estymacji statycznych nacisków osi poruszających się pojazdów i ich masy całkowitej.

## 2. Systemy WIM

Konieczność eliminacji z ruchu pojazdów przeciążonych (powodujących szczególnie intensywne niszczenie infrastruktury drogowej oraz zagrażających bezpieczeństwu ruchu) wymusza potrzebę ich efektywnego ważenia. Z tego powodu następuje dynamiczny rozwój systemów WIM, będących uzupełnieniem punktów statycznej kontroli wagi samochodów i pełniących rolę systemów preselekcyjnych [4].

Pod pojęciem *ważenie poruszającego się pojazdu* rozumie się proces pomiaru dynamicznych sił nacisku kół pojazdu na podłoże i estymację na tej podstawie ich nacisków statycznych lub masy całkowitej pojazdu.

Klasyczne systemy preselekcyjne budowane są zazwyczaj w postaci dwóch czujników nacisku i pętli indukcyjnej, zamontowanych w nawierzchni drogi, współpracujących z systemem komputerowym, realizującym algorytm estymacji masy pojazdu lub statycznego nacisku wywieranego na podłoże przez każdą oś. Fakt, że czujniki reagują na nacisk dynamiczny, nierównomierny rozkład czułości czujników w funkcji ich długości, trudności z wzorcowaniem stanowiska WIM (niezbędne jest wzorcowanie po zainstalowaniu czujników w drodze), wpływ czynników klimatycznych, wpływ sąsiednich blisko siebie położonych osi poruszającego się pojazdu na wynik ważenia, powoduje, że tak zbudowane systemy osiągają dokładności na poziomie 10÷15% i mogą pełnić bardzo istotną, ale jedynie pomocniczą rolę w wykrywaniu pojazdów przeciążonych. Amplituda składowej dynamicznej zależy od prędkości pojazdu, jego konstrukcji oraz jakości nawierzchni i może osiągać dla dużych prędkości, nawet do 40% wartości nacisku statycznego. Przykład względnych zmian nacisku dynamicznego pojedynczej osi pojazdu przy prędkości 80 [km/h] przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Względne zmiany nacisku chwilowego osi pojazdu dla wybranego odcinka drogi, przy prędkości 80[km/h].

Fig. 1 The relative changes of vehicle axle load for given road distance by speed of 80 km/h.

Klasyczna konfiguracja systemu WIM umożliwia zebranie dość bogatej wiedzy o przejeżdżającym pojeździe (detekcja obecności, zliczanie osi, pomiar odległości pomiędzy osiami, pomiar prędkości i długości, wykrywanie przyczepy oraz pomiar nacisku poszczególnych osi i masy całkowitej), jednocześnie wymaga wdrożenia odpowiednich algorytmów przetwarzania danych, korekcy charakterystyk i wpływu czynników zewnętrznych, uwzględnienia wiedzy a priori (zawartej w odpowiednich zarządzeniach [5]) i połączenia (fuzji) tych wszystkich elementów w celu wiarygodnej identyfikacji pojazdu przeciążonego.

Algorytm identyfikacji przeciążonego pojazdu uwzględnia takie czynniki jak: przekroczenie nacisku dowolnej osi, przekroczenie nacisku grupy osi oraz przekroczenie masy całkowitej, a poza tym powinny być wykrywane inne wykroczenia np. przekroczenie dopuszczalnej prędkości czy wymiarów geometrycznych pojazdu. Klasyfikacja pojazdu odbywa się zazwyczaj w oparciu o liczbę jego osi, odległości między nimi i fakt ewentualnej obecności przyczepy.

Estymacja nacisku osi  $W$  wymaga spróbkowania sygnału z czujnika nacisku oraz zastosowania algorytmu, który przetwarza uzyskane próbki uwzględniając dodatkowo informację o aktualnej prędkości  $V$  analizowanej osi, zmiennej w czasie. Sygnał  $u(t)$  generowany przez czujnik nacisku w czasie przetwarzania się przez niego kół ważonej osi, przetwarzany jest zgodnie z zależnością:

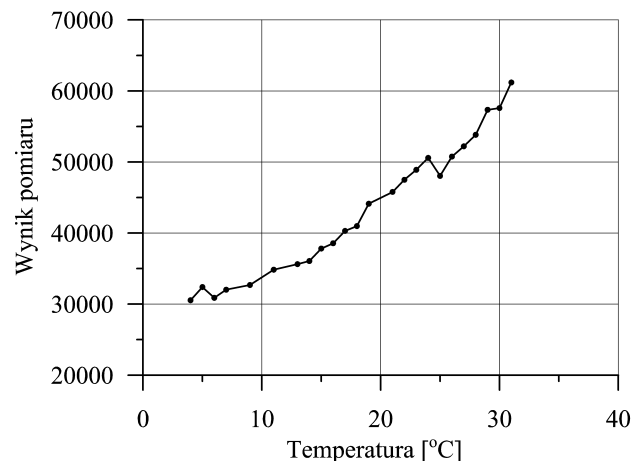
$$W = k_1 \cdot V \cdot \tau \cdot \int_0^{\tau} u(t) dt \quad (1)$$

gdzie:  $\tau$  - czas trwania sygnału,  $k_1$  - współczynnik kalibracji.

Wynik  $W$  jest jedną próbką pobraną z sygnału nacisku przedstawionego na rysunku 1. Takie działanie jest powtarzane dla każdej osi pojazdu i dla każdego czujnika w systemie. W celu jednoznacznej detekcji obecności pojazdu na stanowisku pomiarowym wykorzystywany jest pętlowy czujnik indukcyjny. Jest to konieczne ze względu na poprawność kojarzenia danych (ang. *association*) tj. przyporządkowania wyników pomiarowych do danego pojazdu, szczególnie w przypadku dużego natężenia ruchu i pojazdów jadących bardzo blisko siebie.

Dużą uwagę należy zwrócić na dokładność pomiaru prędkości, ponieważ niedokładność jej pomiaru bezpośrednio przenosi się na niedokładność wyniku końcowego. Prędkość jest mierzona zgodnie z definicją, na podstawie sygnałów z dwóch czujników nacisku zlokalizowanych w znanej i dokładnie określonej odległości. Monitorowanie prędkości pojazdu jest ważne, ze względu na właściwości stosowanych często do ważenia pojazdów czujników piezoelektrycznych, które pracują niepoprawnie (zaniżają wyniki) poniżej 20÷30 km/h [6].

Dokładność estymacji nacisków statycznych osi pojazdów związana jest także z wpływem czynników zewnętrznych, takich jak wilgotność i temperatura. Znacznie większy wpływ niż wilgotność mają zmiany temperatury i ich oddziaływanie na parametry czujników (zmiana czułości), jak i na sztywność nawierzchni, w której są one zamontowane. W związku z tym, systemy WIM wyposażane są dodatkowo w czujnik temperatury nawierzchni jezdni, a algorytmy przetwarzania danych uwzględniają wpływ temperatury na wyniki ważenia, dokonując stosownej korekcy. Przykładowa zależność nieskalibrowanego wyniku ważenia od temperatury przedstawiona została na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność wyniku ważenia od temperatury, na stanowisku z czujnikami piezoelektrycznymi.

Fig. 2. Dependence of weighing results versus temperature in the system with piezoelectric sensors.

Zauważyć można, że w systemie z czujnikami piezoelektrycznymi zmiana temperatury o 30°C może spowodować zmianę wyniku ważenia sięgającą nawet 100%. W oparciu o długoterminowe badania przeprowadzone na stanowisku terenowym wyznaczono funkcję korygującą wpływ temperatury na wyniki ważenia pojazdów. Nacisk skorygowany  $W_k$  i współczynnik korygujący  $k_t$  liczone są zgodnie z zależnościami [8]:

$$W_k = \frac{W}{k_t}; \quad k_t = a \cdot 10^{b \cdot T} + c \quad (2)$$

gdzie  $T$  jest aktualnie zmierzoną temperaturą nawierzchni jezdni wyrażoną w °C. Należy podkreślić, że współczynniki  $a, b, c$  modelu (2) opisują właściwości konkretnego stanowiska WIM (czujniki, rodzaj asfaltu) i nie mogą być przenoszone i stosowane dla innych stanowisk.

Końcowy wynik pomiaru uzyskiwany w systemie WIM, w postaci wektora wspomnianych wcześniej parametrów pojazdu, wymaga uwzględnienia wszystkich przedstawionych aspektów i połączenia danych pomiarowych i danych dostępnych a priori, za pomocą opisanych metod przetwarzania i korekcji wyników. W procesie wypracowania końcowego wyniku pomiaru można wskazać różne sposoby łączenia (fuzji danych). Jednym z nich jest fuzja współpracy mająca na celu poprawę jednoznaczności wyników, poprzez równoczesne wykorzystanie danych z czujników nacisku i czujnika indukcyjnego. Etap ten wykorzystywany jest do poprawnej klasyfikacji pojazdu. Innym sposobem jest fuzja uzupełniająca, mająca na celu zbudowanie wyjściowego wektora danych, opisujących mierzony pojazd w sposób jak najbardziej kompletny. Jeszcze innym jest fuzja właściwości bazująca na wektorze danych pomiarowych oraz wiedzy a priori, a mająca na celu wypracowanie decyzji o ewentualnych wykroczeniach badanego pojazdu. W procesie pomiaru parametrów pojazdu występują również elementy zapewniające redundancję w systemie np. zliczanie osi na dwóch czujnikach nacisku.

Biorąc jednak pod uwagę parametry sygnału dynamicznego nacisku koła na podłoże (rys. 1) oraz fakt, że w klasycznym systemie WIM stosowane są dwa czujniki nacisku (daje to dwie próbki sygnału z rys. 1), dokładność ważenia pojedynczego pojazdu może zmieniać się w bardzo szerokich granicach (nawet do kilkudziesięciu procent jego nacisku statycznego). W związku z tym, podaną wcześniej ocenę dokładności systemów WIM należy rozumieć jako ocenę statystyczną, dla pewnej populacji pojazdów.

### 3. Systemy MS-WIM

Obecnie dąży się do zaprojektowania i zbudowania systemów automatycznie ważących pojazdy w ruchu, które zapewnić mogą odpowiednio wysoką dokładność ważenia pojedynczego pojazdu (na poziomie 2%). W takich systemach możliwe jest ważenie każdego pojazdu, bez zaburzania płynności ruchu drogowego i narzucania dodatkowych ograniczeń na prędkość pojazdu. Wyniki pomiaru mogą być wykorzystane do celów administracyjnych (np. eliminowanie z ruchu pojazdów przeciążonych).

Ze względu na dynamikę jadącego pojazdu [7], zwiększanie dokładności stosowanych czujników nie przynosi pożądanego efektu. Jedyną możliwością, jest zwiększenie liczby czujników nacisku w systemie i zastosowanie metod łączenia danych z tych czujników. Systemy takie nazywane są wieloczujnikowymi systemami ważenia pojazdów w ruchu (MS-WIM – Multi Sensor WIM). Umożliwiają one pomiar takich samych parametrów jak systemy WIM, przy zwiększonej dokładności estymacji statycznych nacisków osi pojazdu i jego masy całkowitej oraz wymiarów geometrycznych pojazdu, a tym samym pozwalają na większą efektywność ich klasyfikacji. Liczba stosowanych czujników nacisku ograniczona jest zazwyczaj względami ekonomicznymi, lub właściwościami stosowanej metody estymacji [10].

System taki, zbudowany w ramach prac prowadzonych w Katedrze Metrologii AGH, składa się z 8 czujników indukcyjnych pętlowych, 16 piezoelektrycznych czujników nacisku i 2 czujników temperatury. Czujniki nacisku są rozmieszczone równomiernie, w odległości 1m od siebie [9]. Każdą parę czujników nacisku obejmuje jeden czujnik indukcyjny pętlowy.

Zbudowany system MS-WIM posiada strukturę hierarchiczną i zawiera osiem systemów podrzędnych oraz system centralny. Każdy system podrzędny stanowi klasyczny układ WIM. Komunikacja między systemami podrzędnymi i centralnym

realizowana jest poprzez interfejsy RS232. Każdy system podrzędny natychmiast po zakończeniu pomiaru (a więc w sposób asynchroniczny) przesyła pełny wektor danych końcowych.

System nadrzędny w pierwszej kolejności dokonuje kojarzenia danych dotyczących danego pojazdu (na stanowisku pomiarowym może w tym samym czasie znajdować się więcej niż jeden pojazd), a następnie porządkuje dane (*ang. alignment*) odpowiadające danemu pojazdowi, ze względu na czas pojawiania się pojazdu na kolejnych czujnikach (niektóre algorytmy estymacji wymagają zachowania sekwencji czasowej). Obydwa te etapy są istotnym elementem procesu fuzji danych realizowanej na poziomie centralnym. Po wykonaniu operacji wstępnych system sprawdza, czy nie zostały przekroczone nałożone ograniczenia (np. zmienność prędkości pojazdu w trakcie przejazdu przez stanowisko pomiarowe, zbyt niska prędkość pojazdu, kompletność danych itp.).

W kolejnym kroku realizowane są funkcje korekcyjne (korekcja charakterystyk czujników temperatury, korekcja wpływu temperatury na wyniki ważenia, korekcja wyników pomiaru prędkości wynikająca z odchyłań powstałych na etapie montażu czujników itp.) oraz algorytmy estymacji nacisków osi pojazdów i wyznaczenia jego parametrów geometrycznych poprzez fuzję danych z systemów podrzędnych. W systemie nadrzędnym archiwizowane są również dane wynikowe oraz podejmowane są decyzje związane z zaklasyfikowaniem danego pojazdu jako spełniającego lub nie, obowiązujące aktualnie przepisy.

Styczne naciski osi pojazdu estymowane są przez algorytmy będące przykładem tzw. fuzji czasowej, polegającej na łączeniu danych dotyczących tego samego obiektu, ale zbieranych w różnych chwilach czasowych, a pochodzących z jednego lub wielu czujników. Algorytmy badane były metodami symulacyjnymi, a niektóre z nich zostały zaimplementowane w systemie rzeczywistym. Analizowano takie algorytmy łączenia danych pomiarowych jak [10]: estymator wartości oczekiwanej, estymator największej wiarygodności (ML), nieliniowy estymator najmniejszej sumy kwadratów (NLS), nieliniowy filtr Kalmana (NKF), zmodyfikowany nieliniowy estymator najmniejszej sumy kwadratów (MNLS), sztuczne sieci neuronowe.

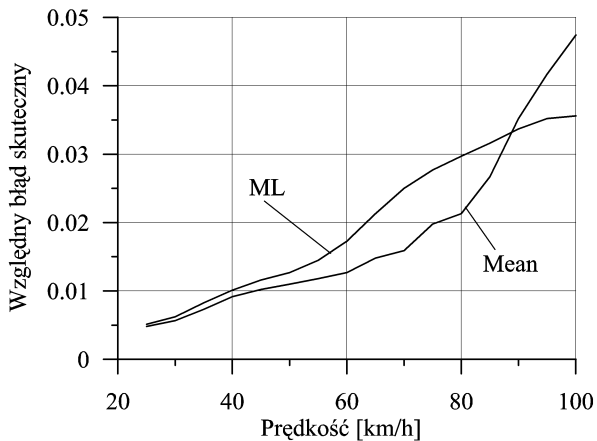
W badaniach symulacyjnych wybranych algorytmów wykorzystano modele: nawierzchni jezdni (sygnał wymuszający), mechaniki zawieszenia pojazdu (na wyjściu tego modelu uzyskuje się sygnał nacisku koła na podłoże) i struktury systemu pomiarowego (liczba i rozmieszczenia czujników oraz parametry określające ich dokładność). Badania symulacyjne przeprowadzono na modelu pojazdu typu „quarter” [7, 9]. Duże zróżnicowanie parametrów modeli pojazdów takich jak: prędkość, masa całkowita, naciski na osie, konstrukcja zawieszenia i wynikające stąd liczba i wartości parametrów składowych dynamicznych zawartych w sygnale pomiarowym powodują, że błędy estymacji statycznego nacisku uzyskiwane badanymi algorytmami estymacji można oceniać jedynie metodami statystycznymi. Do ceny i porównania badanych estymatorów posłużono się tzw. charakterystyką niezawodności [9, 10].

Analizując uzyskane wyniki stwierdzić można, że minimalizacja błędów estymacji masy całkowitej pojazdów poruszających się w szerokim zakresie prędkości wymaga adaptacyjnego doboru algorytmu estymacji w zależności od aktualnej prędkości ważonego pojazdu. Przy wolno jadących pojazdach bardzo dobre właściwości wykazuje algorytm zwykłego uśredniania. Przy większych prędkościach pojazdu znaczną przewagę uzyskują algorytmy o większej złożoności obliczeniowej (ML, MNLS).

Przedstawione badania symulacyjne mogą być podstawą zbudowania bazy wiedzy, umożliwiającej dokonanie takiego wyboru. Baza wiedzy powinna również zawierać informacje dotyczące związków między konstrukcją (klasą) pojazdu, algorytmem estymacji nacisków oraz uzyskiwaną niepewnością pomiaru. Uwzględnienie tych związków stanowi kolejny krok na drodze minimalizacji niepewności ważenia pojazdu w ruchu. Potwierdzają to dane przedstawione w [9]. Wynika z nich, że w

przypadku innej, niż przedstawiona wcześniej konstrukcji pojazdu, również występuje związek między jego prędkością, a optymalnym algorytmem estymacji nacisku, natomiast inne są w tym przypadku zakresy prędkości odpowiednie dla poszczególnych algorytmów.

Wskazuje to na konieczność zastosowania w systemie modułu monitorującego zarówno aktualną prędkość pojazdu, jak i jego klasę oraz realizującego fuzję wiedzy zawartej w zbudowanej bazie (wybór optymalnego w danych warunkach algorytmu estymacji) i wiedzy zawartej w danych pomiarowych pochodzących ze stanowiska WIM. Efekt takiego działania w przypadku monitorowania prędkości pojazdu przedstawia rysunek 3. Zauważyć można, że zmiana algorytmu estymacji nacisku powinna następować przy prędkości około 90 km/h.



Rys. 3. Zależność względnego błędu estymacji nacisku osi pojazdu od jego prędkości i metody estymacji.

Fig. 3. Relative error of vehicle axle load estimation versus its velocity, for different estimation methods.

Niezwykle istotnym zagadnieniem w systemie ważenia pojazdów w ruchu jest zastosowanie odpowiednich metod kalibracji systemu. Do kalibracji przedstawianego systemu MS-WIM wybrano metodę pojazdu wstępnie zważonego [4, 11]. Algorytmy estymacji nacisków osi pojazdu i masy całkowitej powinny być realizowane dopiero na skalibrowanych danych pomiarowych.

Dane zgromadzone w czasie kalibracji wieloczułnikowego systemu WIM zostały podzielone na dwie grupy. Na podstawie pierwszej grupy danych wyznaczono współczynniki kalibracji. Druga grupa danych posłużyła do weryfikacji jakości zbudowanego systemu. Weryfikację przeprowadzono stosując współczynniki kalibracji wyznaczone dla całego stanowiska i dla każdego czujnika z osobna. Brano również pod uwagę różne algorytmy estymacji nacisków statycznych osi pojazdów i ich mas całkowitych. Ze względu na fakt, że dwa czujniki wykazywały rozrzuty wyników znacznie większe niż pozostałe, rozważono przypadki weryfikacji z uwzględnieniem tych czujników i bez nich. Uzyskane wyniki zestawiono poniżej:

1. W przypadku wyznaczenia jednego współczynnika kalibracji dla całego stanowiska i przy pominięciu dwóch czujników oraz stosując estymator wartości oczekiwanej, uzyskano błąd skutecznym systemu o wartości 2.65%.
2. W przypadku wyznaczenia jednego współczynnika kalibracji dla całego stanowiska i przy wykorzystaniu danych ze wszystkich czujników oraz stosując estymator wartości oczekiwanej, uzyskano błąd skutecznym o wartości 1.46%.
3. W przypadku wyznaczenia współczynnika kalibracji dla każdego czujnika z osobna, z pominięciem dwóch czujników oraz stosując estymator wartości oczekiwanej uzyskano błąd skutecznym o wartości 2.35%.
4. W przypadku wyznaczenia współczynnika kalibracji dla każdego czujnika z osobna oraz stosując estymator wartości oczekiwanej, ale dla wszystkich czujników, uzyskano błąd skutecznym o wartości 2.28%.

5. W przypadku wyznaczenia współczynnika kalibracji dla każdego czujnika z osobna, z pominięciem dwóch czujników, ale przy zastosowaniu innych estymatorów, uzyskano błędy: dla estymatora MNLS – 2.21%, a dla estymatora ML – 2.06%

Wyznaczono również charakterystyki niezawodności dla rzeczywistego stanowiska pomiarowego MS-WIM. Wynika z nich, że żaden z pojazdów biorących udział w eksperymencie nie został zważony (w sensie masy całkowitej) z błędem większym niż 4%.

## 4. Wnioski

W pracy przedstawiono problem wykorzystania metod fuzji danych w układach i systemach pomiarowych, na przykładzie systemów ważenia pojazdów w ruchu. Przedstawiono poszczególne etapy takiego procesu: porządkowanie i kojarzenie danych wejściowych z wielu czujników (czasami dotyczących różnych obiektów), działania korekcyjne i kompensujące wpływy np. czynników zewnętrznych oraz algorytmy realizujące łączenie danych. Pokazano konieczność łączenia danych pomiarowych z informacjami posiadanymi a priori i możliwość zastosowania adaptacyjnego doboru najbardziej odpowiedniego algorytmu w zależności od aktualnie posiadanych informacji o obiekcie. Wykazano, że dzięki zastosowaniu systemu wieloczułnikowego i metod fuzji danych zmniejszono niepewność wyników ważenia z 15% (systemy WIM) do około 2.5% (systemy MS-WIM). Z analizy danych rzeczywistych wynika, że kalibrowanie każdego czujnika w systemie z osobna i stosowanie bardziej zaawansowanych algorytmów estymacji nacisku pozwala uzyskać mniejsze niepewności pomiaru. Wynika z nich również, że istnieją przypadki, kiedy połączenie (fuzja) danych z czujników o różnych dokładnościach może dać lepsze efekty niż wykorzystanie wyłącznie danych z wybranych lepszych czujników.

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

## 5. Literatura

- [1]. Hall D.: *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*, Artech House, London 1992.
- [2]. Klein L.A.: *Sensor and Data Fusion Concepts and Applications*, SPIE, Washington 1999.
- [3]. Klein L.A.: *Sensor Technologies and Data Requirements for ITS*, Artech House, London 2001.
- [4]. Weigh-in Motion of Road Vehicle, Final Report of COST 323 action, Ver. 3.0, 1999.
- [5]. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Nr 44, z dnia 15.05.1999, Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej nr 432 z dnia 1.04.1999 w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia.
- [6]. Gajda J., Sroka R., Stencel M., Wajda A., Żegleń T.: „Pomiary parametrów ruchu drogowego – ocena dokładności”, *Drogownictwo*, październik 2003, nr.10, Wydawnictwo Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji, pp. 323-331.
- [7]. Cebon D.: *Handbook of Vehicle-Road Interaction*, Swets&Zeitlinger B.V., Lisse, the Netherlands 1999.
- [8]. Burnos P.: Analiza niestacjonarności systemów WIM. *Miesięcznik Naukowo-Techniczny PAK*, nr 10bis'2006, pp. 72-76, Agenda Wydawnicza SIMP.
- [9]. Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T.: Modelowanie i badania symulacyjne wieloczułnikowego systemu ważenia pojazdów samochodowych w ruchu. *Miesięcznik Naukowo-Techniczny PAK*, nr 3'2007, Agenda Wydawnicza SIMP, pp. 78-86.
- [10]. Botwinowski T., Piotrowski R., Sroka R.: *Zastosowanie sieci neuronowych w procesie estymacji nacisku statycznego osi poruszających się pojazdów*. *Miesięcznik Naukowo-Techniczny PAK*, nr 10bis'2006s, pp. 66-71, Agenda Wydawnicza SIMP.
- [11]. Gajda J., Sroka R.: Analiza dokładności systemów WIM kalibrowanych metodą pojazdu wstępnie zważonego. *Materiały XV Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych*, Krynica 2005, pp. 111-122.