



PIOTR BURNOS

AGH w Krakowie
burnos@agh.edu.pl

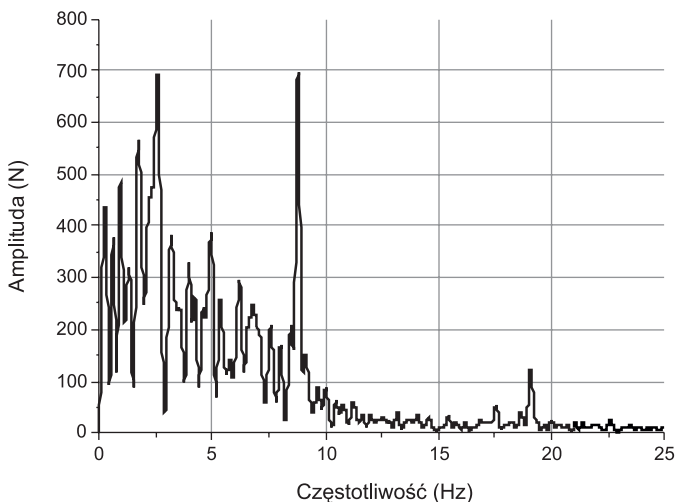
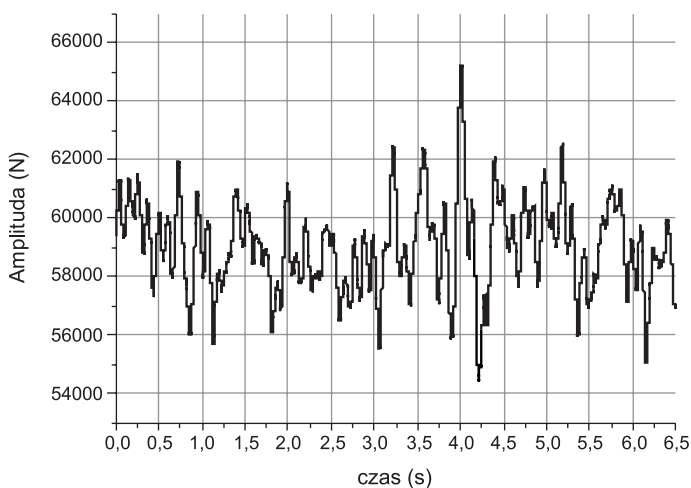
Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu

Część 2: Rodzaje i charakterystyka systemów *Weigh In Motion (WIM)*

Zgodnie z definicją sformułowaną przez *American Society for Testing and Materials*: „ważenie pojazdów w ruchu jest to proces estymacji nacisków statycznych na podstawie pomiarów dynamicznych nacisków kół pojazdu na podłoże, w sytuacji, kiedy kontakt obiektu mierzonego z czujnikiem nacisku jest bardzo krótki” [1].

Biorąc pod uwagę tę definicję, przedmiotem pomiaru w systemach *WIM* może być ilościowe określenie dwóch parametrów charakteryzujących mechaniczne oddziaływanie pojazdu na podłoże:

Biorąc pod uwagę tę definicję, przedmiotem pomiaru w systemach *WIM* może być ilościowe określenie dwóch parametrów charakteryzujących mechaniczne oddziaływanie pojazdu na podłoże:



Rys. 1. Sygnał chwilowego nacisku koła pojazdu ciężarowego przy prędkości 80 km/h, oraz widmo składowej dynamicznej tego sygnału (po usunięciu składowej stałej) [2]

- nacisku statycznego poszczególnych osi pojazdu oraz jego masy całkowitej,
- chwilowej wartości nacisku osi pojazdu na podłoże, która jest jednym z głównych czynników przyspieszających degradację nawierzchni jezdni.

W nacisku kół poruszającego się pojazdu można więc wyróżnić dwie składowe: statyczną i dynamiczną. Pierwsza z nich jest wywołana grawitacją i można ją wyznaczyć dla nieruchomego pojazdu (i do tej właśnie składowej odnoszą się wszelkiego rodzaju zarządzenia określające naciski dopuszczalne). Druga składowa, dynamiczna, występuje w czasie jazdy, a jej amplituda (i częstotliwość) jest zależna od prędkości poruszającego się pojazdu, stanu oraz parametrów jego zawieszenia, stanu technicznego nawierzchni jezdni i skrajnie może osiągać nawet 40% wartości nacisku statycznego. W strukturze częstotliwościowej sygnału takiego nacisku występują dwie dominujące częstotliwości: pierwsza związana jest z masą nadwozia pojazdu (tzw. masa zawieszona) i zawiera się w przedziale 1–4 Hz, druga związana z masą zawieszenia i kół (tzw. masa niezawieszona) mieści się w granicach 8–12 Hz.

Przykład sygnału nacisku koła pojazdu ciężarowego na podłoże oraz jego widmo przedstawiono na rysunku 1. Rejestrację uzyskano w tzw. pojeździe oprzyrządowanym, który dzięki wyposażeniu w aparaturę pomiarową montowaną na elementach konstrukcyjnych osi i kół, umożliwia „samoważenie”. Zaprezentowane wyniki pochodzą z przejazdu po nawierzchni w dobrym stanie technicznym, przy prędkości około 80 km/h. Dane uzyskano dzięki uprzejmości holenderskiego Ministerstwa Transportu [2].

Cechy systemów *WIM*

W skład systemu *WIM* wchodzi: zestaw czujników nacisku, które są montowane w nawierzchni jezdni, układ kondycjonowania sygnałów współpracujący z czujnikami oraz system nadrzędny z zaimplementowanym algorytmem estymacji nacisków statycznych osi i innych parametrów pojazdu. Proces ważenia dynamicznego polega na rejestracji i przetwarzaniu sygnałów generowanych przez czujniki pod wpływem nacisków osi poruszającego się pojazdu. Ponieważ czujniki są montowane bezpośrednio w jezdni, prostopadle do kierunku ruchu (fot. 1), to każda oś przejeżdżającego przez stanowisko pojazdu podlega ważeniu.

Za najbardziej atrakcyjną cechę systemów *WIM* należy uznać brak istotnego ograniczenia prędkości kontrolowanego pojazdu (z wyjątkiem systemów wolnoprzejazdowych *LS-WIM*). Okupione jest to jednak małą dokładnością wyników ważenia, co powoduje, że systemy tego typu są na ogół



Fot. 1. System WIM z czujnikami wbudowanymi w nawierzchnię jezdni (fot. Autor)

uzupełnieniem stanowisk statycznego ważenia pojazdów. Systemy szybkoprzejazdowe pełnią obecnie rolę systemów preselekcyjnych umożliwiając wstępny wybór pojazdów podejrzanych o przekroczenie dopuszczalnego obciążenia. Współpraca systemów WIM z dokładnymi wagami statycznymi podnosi tym samym efektywność kontroli pojazdów, nie zaburzając normalnego ruchu drogowego. Najbardziej zaawansowane prace nad zastosowaniem systemów WIM, jako wag administracyjnych, umożliwiających bezpośrednie karanie kierowców, są prowadzone w Czechach [3].

Biorąc pod uwagę wszystkie cechy systemów WIM, do ich zalet należy zaliczyć [4]:

- brak konieczności zatrzymywania kontrolowanych pojazdów,
- wykonywanie pomiarów w szerokim zakresie prędkości pojazdów,
- automatyczną pracę,
- możliwość prowadzenia statystycznej analizy danych pomiarowych w celu określenia udziału pojazdów przeciążonych w strumieniu pojazdów,
- mały koszt pomiarów, a także budowy stanowiska pomiarowego (w porównaniu z wagą statyczną oraz kosztami remontów zniszczonej nawierzchni).

Natomiast główne wady systemów WIM to:

- mała dokładność pomiaru,
- pełnienie wyłącznie roli systemów preselekcyjnych (z wyjątkiem dokładnych wag wolno-przejazdowych LS-WIM).

Oprócz kontroli masy pojazdów, dane gromadzone w systemach WIM mogą być wykorzystane do:

- zapewnienia warunków uczciwej konkurencji między firmami przewozowymi, w tym między różnymi formami transportu,
- analizy struktury rodzajowej ruchu drogowego oraz identyfikacji nacisków osi pojazdów ciężarowych,
- projektowania i zarządzania infrastrukturą drogową,
- zarządzania ruchem drogowym i optymalizacji przepływu tego ruchu,
- pobierania opłat za użytkowanie autostrad,
- przygotowania podstaw legislacyjnych dotyczących bezpieczeństwa ruchu (pojazdy przeładowane są gorzej stero-

walne i stwarzają zagrożenie dla innych użytkowników ruchu),

- analiz ekonomicznych i ochrony środowiska (pojazdy przeciążone emitują znacznie więcej zanieczyszczeń i powodują powstawanie większego hałasu).

Podział systemów WIM

Systemy ważenia dynamicznego pojazdów można podzielić następująco:

- Systemy pokładowe (*On-Board WIM*)
- Systemy drogowe
 - ◆ Nieinwazyjne (np. sejsmiczne)
 - ◆ Wbudowane
 - * Systemy mostowe (*Bridge-WIM*)
 - * Systemy nawierzchniowe
 - ⇒ Systemy pracujące przy małej prędkości (*Low Speed-WIM*)
 - ⇒ Systemy pracujące przy dużej prędkości (*High Speed-WIM*)
 - Jedno- i dwuczujnikowe systemy WIM
 - Wieloczujnikowe systemy WIM (*Multi-Sensor-WIM*)

Systemy pokładowe stanowią margines ogółu stosowanych metod, jednak dynamika ich rozwoju pozwala przewidywać ich coraz częstsze zastosowanie.

Najpopularniejszą i najpowszechniej stosowaną obecnie grupą systemów ważenia pojazdów w ruchu są systemy WIM wbudowane w nawierzchnię jezdni. Jest to również najbardziej różnorodna w sensie konstrukcyjnym grupa systemów. Zalicza się do niej wagi wolnoprzejazdowe LS-WIM (*ang. Low Speed – WIM*) i szybkoprzejazdowe HS-WIM (*ang. High Speed – WIM*). W grupie systemów HS-WIM rozróżnia się z kolei systemy jedno- lub dwuczujnikowe oraz takie, które zbudowane są z większej liczby czujników nacisku tzw. MS-WIM (*ang. Multi – Sensor – WIM*). W krajach o dużej liczbie obiektów mostowych popularność zdobyły systemy B-WIM (*ang. Bridge-WIM*).

Systemy LS-WIM

Pierwsze wagi tego typu uruchomiono w 1978 r. w Anglii, a w latach kolejnych w kilku krajach Europy Zachodniej [5], gdzie pracują często w punktach poboru opłat za korzystanie z dróg i autostrad. Od kilkunastu lat stosowane są również w Polsce jako wagi administracyjne.

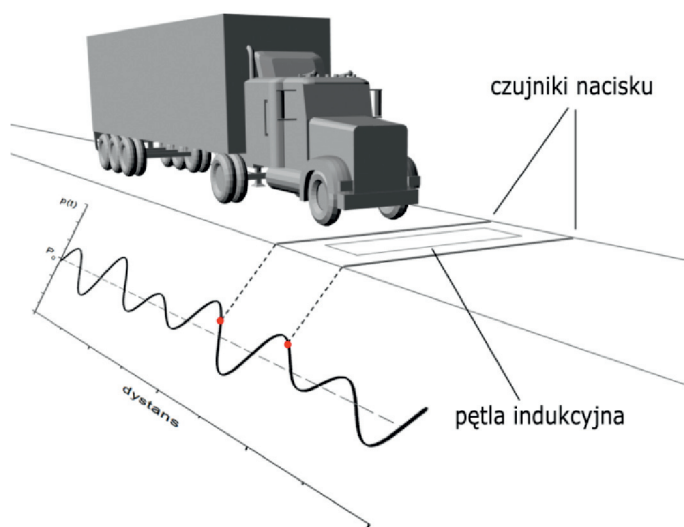
Systemy LS-WIM umożliwiają ważenie pojazdów w ruchu, ale przy bardzo ograniczonej prędkości pojazdu, zwykle poniżej 10 km/h. Takie ograniczenie prędkości oraz specjalna konstrukcja stanowiska ważącego ma na celu radykalne zmniejszenie niekorzystnego wpływu składowej dynamicznej nacisków osi na dokładność uzyskiwanych wyników ważenia. Wagi tego typu są na stałe montowane w nawierzchni specjalnie przygotowanego stanowiska kontrolnego (płaski, poziomy, odpowiednio utwardzony odcinek), które powinno znajdować się poza głównym przekrojem drogi. Do pomiaru nacisków osi stosuje się najczęściej tensometryczne lub pojemnościowe czujniki nacisku o szerokości rzędu 40-50 cm. Schemat poglądowy systemu LS-WIM przedstawiono na rys. 2.

Systemy HS-WIM

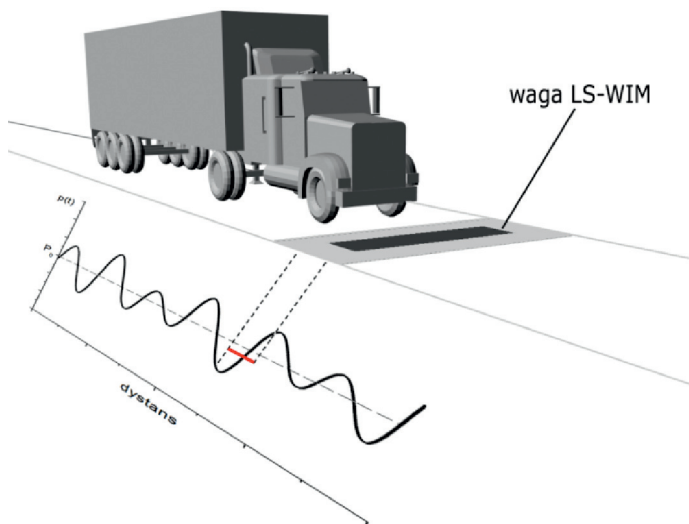
Systemy HS-WIM umożliwiają ważenie pojazdu na pasie ruchu, którym się porusza, bez ograniczania jego prędkości. Dzięki temu cały proces jest automatyczny, kontroli podlega każdy pojazd poruszający się danym odcinkiem drogi, a w konsekwencji efektywność ważenia jest dużo większa niż w przypadku systemów LS-WIM czy stanowisk statycznych. Systemy HS-WIM na szeroką skalę zaczęto stosować w latach 80 XX wieku. Główną motywacją stymulującą ich rozwój był z jednej strony monotoniczny wzrost natężenia ruchu drogowego, a z drugiej ograniczona przepustowość i wytrzymałość infrastruktury drogowej.

W systemach tego typu, nacisk osi najczęściej jest mierzony za pośrednictwem piezoelektrycznych polimerowych bądź kwarcowych czujników nacisku, montowanych bezpośrednio w nawierzchni jezdni prostopadle do kierunku ruchu. Dzięki takiej konstrukcji systemy HS-WIM nie narzucają ograniczenia na prędkość ważonego pojazdu. Duża prędkość powoduje jednak, że w nacisku osi na podłożu dominuje składowa dynamiczna wymuszona nierównościami nawierzchni drogi. Dodatkowo, zastosowanie czujników piezoelektrycznych lub kwarcowych o szerokości kilku centymetrów powoduje, że kontakt opony z czujnikiem następuje na niewielkim odcinku jej obwodu. Takie zestawienie warunków pomiaru skutkuje tym, że pomiarowi podlega wartość chwilowa nacisku osi, która może znacznie różnić się od składowej statycznej. Na rysunku 3 czerwonymi kropkami zaznaczono chwilę pomiaru nacisku osi przez czujniki systemu WIM. Wartości obydwu próbek są zawyżone w stosunku do wartości statycznej (linia przerywana).

W typowych konstrukcjach stanowiska stosuje się dwa czujniki nacisku, co umożliwia zebranie dwóch próbek z każdej osi pojazdu, a wynik ważenia jest obliczany jako średnia arytmetyczna. Pozwala to ograniczyć niekorzystny wpływ składowej dynamicznej na wynik pomiaru. Suma tak obliczonych nacisków wszystkich osi pojazdu stanowi ocenę jego masy całkowitej. Dokładność pomiaru wynosi od 7 do 20%. Oprócz czujników nacisku system jest wyposażony również w czujniki indukcyjne pętlowe, które pełnią rolę de-



Rys. 3. Schemat poglądowy stanowiska HS-WIM

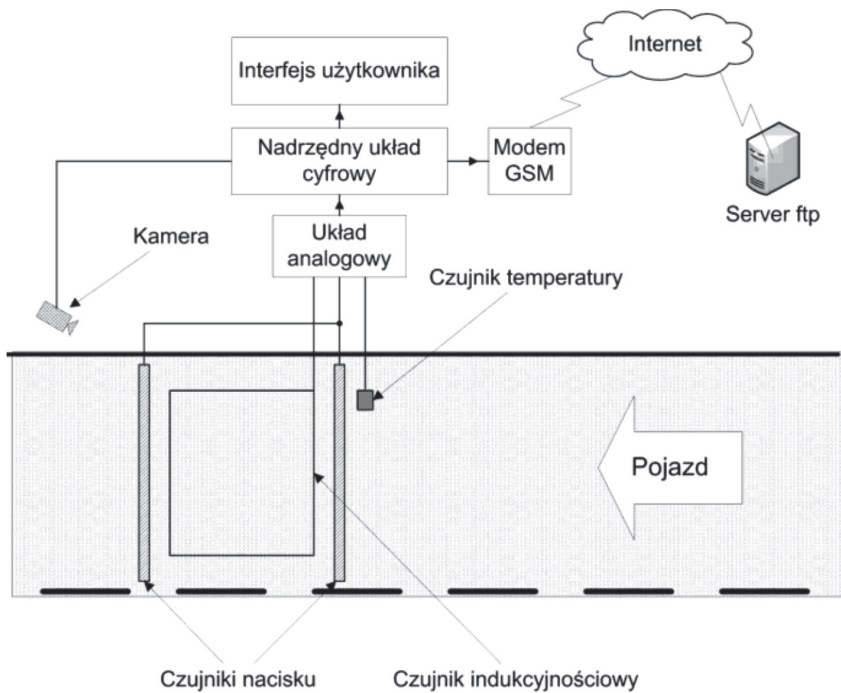


Rys. 2. Schemat poglądowy stanowiska LS-WIM

Duża szerokość czujników nacisku w stosunku do szerokości odcinka kontaktu opony z podłożem, oraz ograniczenie prędkości pojazdu powoduje, że waga LS-WIM uśrednia składowe dynamiczne nacisku osi. Jest to zobrazowane na rysunku 2, na którym: linia ciągła symbolizuje zmienność nacisku wybranej osi pojazdu pięcioosiowego, pozioma linia przerywana wartość nacisku wyznaczoną w warunkach statycznych, natomiast czerwoną linią zaznaczono wynik uśredniania nacisku na odcinku, na którym opona ma kontakt z czujnikiem nacisku.

Dzięki dużej dokładności (błąd na poziomie 2%), wagi LS-WIM mogą być wykorzystywane do nakładania kar administracyjnych na właścicieli pojazdów przeciążonych. Dodatkową zaletą ważenia wolnoprzejazdowego jest automatyzacja całego procesu oraz jego skrócenie w stosunku do pomiarów statycznych. Wspólną cechą ważenia wolnoprzejazdowego i statycznego jest jednak to, że kontrola wymaga wyłączenia pojazdu z ruchu drogowego i skierowania go na stanowisko pomiarowe. Ponadto do wad systemów LS-WIM należy również zaliczyć trudności z utrzymaniem małej prędkości przez pojazd, a w przypadku jej zmiany wymagane jest powtórne ważenie. Szczególne problemy mogą stwarzać pojazdy przewożące materiały płynne, które powinny być ważone po stabilizacji przewożonego ładunku. Ze względu na konieczność przygotowania specjalnego stanowiska pomiarowego, koszty instalacji i utrzymania systemów LS-WIM są wysokie.

Obecny stan techniki umożliwia budowanie systemów, które łączą w sobie cechy dokładnych systemów LS-WIM z systemami dedykowanymi do pomiarów przy większych prędkościach. Przykładem może być system opisany w pracy [6], w którym dzięki odpowiedniemu kondycjonowaniu i przetwarzaniu sygnałów pomiarowych z kwarcowych czujników nacisku uzyskano możliwość wykonywania pomiarów przy prędkości ważonego pojazdu od 1 do ponad 100 km/h. System taki umożliwia kontrolę masy pojazdów w zwykłym ruchu drogowym oraz o charakterze „stop & go”, który występuje przy bramkach poboru opłat za przejazd płatnymi odcinkami autostrad.



Rys. 4. Przykładowa struktura systemu HS-WIM

tektora obecności pojazdu na stanowisku oraz pozwalają na pomiar dodatkowych jego parametrów, takich jak: długość zastępcza, obecność przyczepy etc.

Systemy HS-WIM charakteryzują się dużą różnorodnością strukturalną układów kondycjonowania i przetwarzania sygnałów pomiarowych. Ich budowa i funkcje zależą od rodzaju zastosowanych w systemie czujników nacisku, liczby mierzonych parametrów poruszających się pojazdów etc. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy system HS-WIM, który zbudowano w Katedrze Metrologii i Elektroniki AGH w Krakowie. System ten ma klasyczną strukturę, w skład której wchodzi dwa czujniki nacisku, jedna pętla indukcyjna oraz czujnik temperatury asfaltu [7].

Czujniki nacisku mają długość odpowiadającą szerokości pasa ruchu, natomiast odległość między nimi jest dobierana indywidualnie do danego stanowiska na podstawie badań symulacyjnych uwzględniających charakter ruchu drogowego oraz jakość nawierzchni. Z czujnikami współpracuje podrzędny analogowy układ kondycjonowania sygnałów, na wyjściu którego otrzymuje się sygnał proporcjonalny do siły nacisku mierzonej osi pojazdu. Zadaniem nadrzędnego układu cyfrowego jest algorytmiczna obróbka sygnałów, estymacja nacisków osi i innych parametrów pojazdów oraz korekcja temperaturowa wyników ważenia etc. Ponadto układ cyfrowy umożliwia archiwizację, wizualizację i analizę danych pomiarowych. Komunikacja z systemem może odbywać się za pośrednictwem interfejsów przewodowych (np. USB, RS232) lub bezprzewodowych poprzez sieć GSM. W przypadku wyposażenia systemu w kamerę wizyjną, możliwa jest identyfikacja pojazdu podejrzanego o przeciążenie. W tym celu stosuje się tzw. systemy AVI (Automatic Vehicle Identification), umożliwiające odczyt i rozpoznanie numerów z tablic rejestracyjnych [8].

Zwiększenie dokładności wyników ważenia w systemach HS-WIM jest możliwe poprzez ograniczenie wpływu głównego czynnika wywołującego błędy ważenia, a mianowicie

składowej dynamicznej nacisku osi. Efekt ten można uzyskać jedynie poprzez zebranie większej liczby próbek nacisku osi i ich algorytmiczną obróbkę. Realizacja tej koncepcji wymaga zainstalowania większej liczby czujników nacisku. Systemy takie nazywają się MS-WIM.

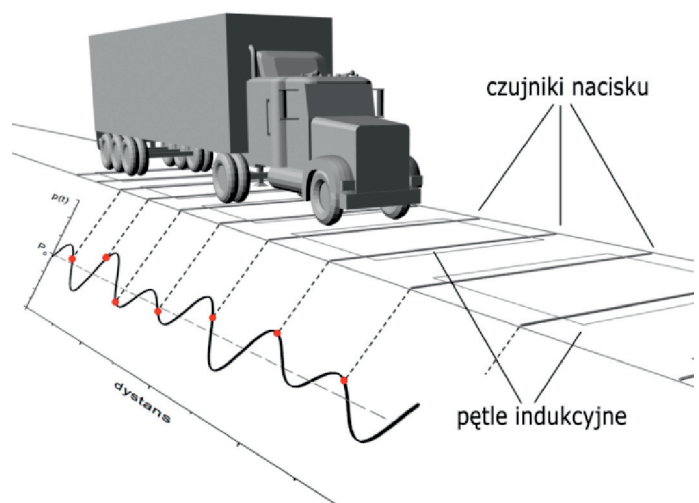
Systemy MS-WIM

Koncepcja systemów wieloczujnikowych MS-WIM (Multi – Sensor – WIM) powstała równoległe w Wielkiej Brytanii i Francji na początku lat 90 [9], [10], [11]. Priorytetem podejmowanych działań było (i nadal jest) uzyskanie dużej dokładności i powtarzalności wyników ważenia (na poziomie 2%), co umożliwiłoby stosowanie systemów MS-WIM zamiast systemów ważenia statycznego. Aby jednak było możliwe wykorzystanie wag MS-WIM w celach administracyjnych, konieczne jest wprowadzenie odpowiednich uwarunkowań prawnych. Prace legislacyjne w tym kierunku prowadzone są w niektórych krajach europejskich [3], [12].

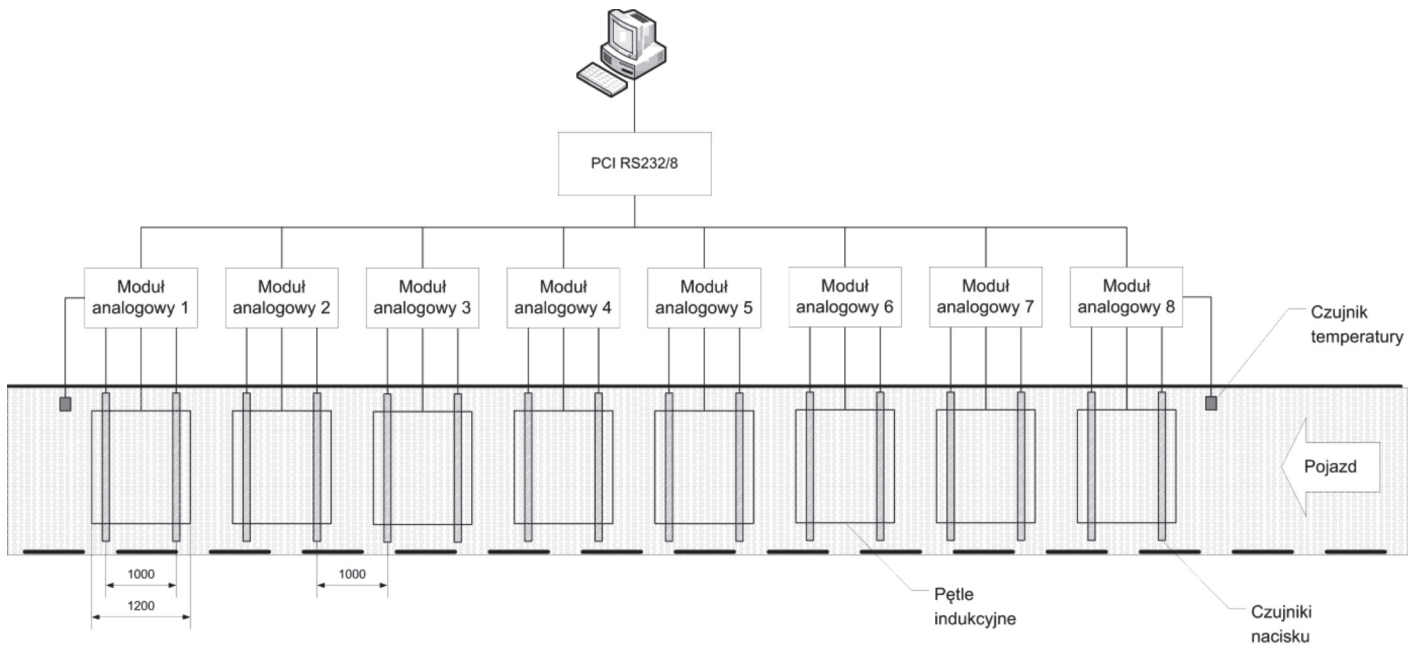
Ze względu na składową dynamiczną nacisku osi poruszającego się pojazdu, zwiększanie jedynie dokładności stosowanych czujników i aparatury pomiarowej nie przynosi pożądanych efektów. Jedyną możliwością jest zwiększenie liczby zastosowanych w systemie czujników i „gęstsze” próbkowanie sygnału nacisku osi.

Z rysunku 5 wynika, że w systemach MS-WIM zwykłe uśrednienie pozyskanych próbek nacisku osi przyniesie lepsze przybliżenie składowej statycznej, niż w przypadku dwuczujnikowych systemów HS-WIM. Ponadto przy liczbie próbek większej niż dwie, oprócz średniej arytmetycznej, można zastosować bardziej wyszukane estymatory składowej statycznej nacisku osi, takie jak: estymator ML (maximum likelihood), nieliniowy estymator LS (least squares), nieliniowy filtr Kalmana czy sieci neuronowe.

Wyzwaniem, które wciąż stoi przed konstruktorami systemów MS-WIM, jest określenie optymalnej liczby i rozmieszcze-



Rys. 5. Schemat poglądowy systemu MS-WIM



Rys. 6. Struktura systemu MS-WIM zbudowanego w Katedrze MiE AGH w Krakowie

nia czujników nacisku wzdłuż pasa ruchu na którym odbywa się pomiar [11]. Zasada „im więcej czujników tym lepiej” obowiązuje tylko do pewnego stopnia, gdyż jak wykazano [13], powyżej pewnej ich liczby, nie następuje istotna poprawa dokładności wyników ważenia. Ponadto liczba próbek zależy również od zastosowanego algorytmu estymacji oraz stanu technicznego nawierzchni jezdni i prędkości pojazdu [14]. Kombinacja tych wszystkich czynników powoduje, że problem jest wielowymiarowy i niejednoznaczny. Dodatkowym ograniczeniem są względy ekonomiczne, szczególnie przy zastosowaniu droższych czujników kwarcowych.

Jedyne w Europie Środkowo-Wschodniej stanowisko wieloczujnikowe zostało zaprojektowane i zbudowane w Katedrze Metrologii i Elektroniki AGH (rys. 6). Wyposażona w 16 czujników nacisku waga MS-WIM jest przeznaczona do prac badawczych [14], [15].

Stanowisko zbudowane w miejscowości Gardawice wyposażone jest w 16 czujników polimerowych, 8 czujników indukcyjnych oraz 2 czujniki temperatury umieszczone na początku i końcu stanowiska. Czujniki nacisku są rozmieszczone równomiernie, a odległość między nimi wynosi 1 m [16]. Każdą parę czujników nacisku obejmuje jeden czujnik indukcyjny, co tworzy zestaw jak w klasycznym systemie dwuczujnikowym. Takie podejście umożliwia modułową budowę układu kondycjonowania sygnałów, który składa się z ośmiu prototypowych systemów podrzędnych. Każdy z nich współpracuje z dwoma czujnikami nacisku, jednym czujnikiem pętlowym oraz czujnikiem temperatury. System nadrzędny zbudowano w oparciu o komputer klasy PC oraz kartę PCI RS232/8 firmy *National Instruments*. Karta zwiększa liczbę portów RS232 komputera do ośmiu, co jest konieczne ze względu na modułową strukturę systemu i sposób transmisji danych [17]. Oprogramowanie MS_WIM v.1.0 steruje pracą systemów podrzędnych, odbiera i przetwarza dane pomiarowe, a także umożliwia ich wizualizację oraz archiwizację.

Inne systemy WIM

Inne systemy ważenia dynamicznego stanowią margines ogółu stosowanych metod i wciąż są przedmiotem intensywnych prac badawczych. Do tej grupy zalicza się systemy pokładowe, sejsmiczne i najbardziej popularne w tej grupie systemy mostowe.

Aparatura pomiarowa pokładowych systemów WIM jest montowana na pojeździe i stanowi jego integralną część [18]. Stąd mówi się, że pojazd podlega samoważeniu, a proces ten jest realizowany permanentnie w trakcie jazdy lub postoju pojazdu. Umożliwia to, nawet przy występujących zakłóceniach, uzyskanie dużych dokładności pomiaru, dzięki możliwości ciągłego uśredniania rejestrowanych danych pomiarowych.

W systemach wykorzystujących przetworniki sejsmiczne (montowane np. w poboczu drogi) wielkością mierzoną są drgania gruntu [19]. Wykazano, że ich częstotliwość i amplituda zależą od masy poruszających się pojazdów, co pozwala na estymację tej wielkości.

Z kolei w systemach mostowych, wykorzystuje się czujniki tensometryczne, które mierzą odkształcenia konstrukcji [20]. Dzięki odpowiedniej konfiguracji czujników i algorytmicznej obróbce sygnałów możliwa jest nawet ocena nacisków pojedynczych osi pojazdów członowych.

Podsumowanie

W artykule opisano cechy najpopularniejszych systemów WIM w kontekście ich zdolności do ograniczania wpływu składowej dynamicznej nacisku osi na dokładność wyników ważenia. Systemy LS-WIM ze względu na dużą szerokość czujników nacisku oraz ograniczoną prędkość ważonego pojazdu uzyskują dużą dokładność ważenia. Efektywność takich kontroli jest jednak mała, gdyż pojazd musi zostać