



Elektroniczne narzędzia pomiarowe w transporcie – wagi preselekcyjne

dr hab. inż. **ANDRZEJ W. MITAS** prof. Pol. Śl., Instytut Maszyn Matematycznych, Warszawa

dr **MARCIN BERNAŚ**, Politechnika Śląska, Katowice, dr inż. **MARCIN BUGDOL**, Politechnika Śląska, Gliwice

mgr inż. **ARTUR RYGUŁA**, Politechnika Śląska, Katowice, mgr inż. **WITOLD KONIOR**, APM, Bielsko-Biała

Transport drogowy ma kluczowe znaczenie w dzisiejszym świecie. Układ komunikacyjny jest niezwykle ważnym czynnikiem rozwoju we wszystkich aspektach życia społecznego, a przede wszystkim ekonomicznego. Każdy człowiek jest uzależniony od dostępności i jakości sieci drogowej. Możliwość dojazdu samochodów dostawczych jest podstawowym czynnikiem determinującym lokalizację zakładów przemysłowych, natomiast szybki dojazd do pracy czy do sklepu jest niejednokrotnie elementem decydującym o wyborze miejsca zamieszkania.

Problemy transportowe, znamienne dla społeczeństw wysoko rozwiniętych, implikują poważne zaangażowanie środków elektronicznych i narzędzi informatycznych. Przykładem może być system elektronicznego poboru opłat w naszym kraju. Codzienna praktyka wykazuje oczywiście kolejne, nieuniknione słabe punkty, których eliminacja prowadzi do usprawnienia działania. Niemniej jednak zastosowanie specjalistycznych rozwiązań układów i urządzeń elektronicznych wydaje się być jednym ze sposobów wielkoobszarowego monitoringu realnej sytuacji drogowej w czasie rzeczywistym. Wysokozaszumione sygnały z czujników pomiarowych mogą być przetwarzane sprzętowo, co zazwyczaj pociąga za sobą znaczące nakłady finansowe, zwielenotnianie na poszczególne aplikacje. Alternatywnym sposobem rozwiązania tego problemu jest opracowanie i wdrożenie odpowiednich algorytmów ekstrakcji sygnałów użytecznych i wyznaczania poszukiwanych parametrów.

Dynamiczny rozwój transportu drogowego w przeciągu ostatnich 20 lat w Polsce spowodował znaczny wzrost liczby użytkowników, nieadekwatny do postępów w rozwoju sieci drogowej. Wzrost ten dotyczy zarówno użytkowników pojazdów osobowych, jak i samochodów ciężarowych. Masa pojazdów w wielu przypadkach przekracza dopuszczalne obciążenia dla danej klasy pojazdu, a przede wszystkim, w przypadku pojazdów ciężarowym, dopuszczalny nacisk osi na nawierzchnię danej drogi.

Program badawczy LTPP (*Long Term Pavement Performance*) prowadzony w Stanach Zjednoczonych ujawnia, że zwiększenie obciążenia drogi o 10%, na oś przeliczeniową może zwiększyć o 45% przewidywane zniszczenie drogi [16]. W Polsce dane statystyczne Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad wskazują, iż liczba pojazdów przeciążonych wynosi w przybliżeniu trzydzieści procent ogólnej liczby pojazdów ciężarowych. Jednak szeroko zakrojone badania statystyczne w przedmiotowej dziedzinie nie są jeszcze realizowane w Polsce. Dane już tylko z wagi zlokalizowanej na autostradzie A2 pokazują dowodnie, że około 1...1,5% zarejestrowanych pojazdów ma przekroczoną masę całkowitą powyżej 40 ton [17]. Część autostrady, na której zlokalizowana jest waga, jest systematycznie monitorowana przez patrol ITD, co nie stanowi elementu zaskoczenia, zatem wynik ten prawdopodobnie nie daje pełnego obrazu sytuacji. Inne badania wskazują jednak na silny związek między skutecznym karaniem przewoźników, wysokim poziomem kar, a znacznym spadkiem udziału samochodów przeciążonych w ruchu drogowym [18].

W związku z powyższym, biorąc pod uwagę skalę problemu oraz wysokie ryzyko uszkodzenia nawierzchni, pociągającego za sobą nie tylko znaczne koszty naprawy, ale przede wszystkim trudno przeliczalne skutki wynikające z utrudnienia ruchu, należy zwiększyć stopień ochrony przed przeciążonymi pojazdami. Zadanie to może być zrealizowane poprzez zastosowanie narzędzi oraz systemów monitorowania rzeczywistej masy pojazdu.

Aktualne rozwiązania

W kolejnych podpunktach opracowania scharakteryzowano najbardziej popularne czujniki wykorzystywane w instalacjach wag preselekcyjnych. Do zestawienia wybrano urządzenia obecne na rynku krajowym oraz takie, które są szeroko wykorzystywane w Europie lub Ameryce Północnej (w Kanadzie oraz w Stanach Zjednoczonych).

Czujniki kwarcowe

W systemach kwarcowych wykorzystuje się zjawisko piezoelektryczne proste, którego podstawą jest indukcja ładunku elektrycznego na powierzchni dielektryka w wyniku działania sił mechanicznych [1].

Czujniki kwarcowe montuje się równo z powierzchnią jezdni, dzięki czemu koło ma bezpośredni kontakt z sensorem, a temperatura i charakterystyka asfaltu nie ma wpływu na dokładność pomiaru. Wadą takiego montażu są powstające pęknięcia nawierzchni w okolicach czujnika, jak i możliwość uszkodzenia samego przetwornika.

Maksymalna długość oferowanych czujników wynosi 2 metry. Oznacza to, iż aby objąć cały pas jezdni należy odpowiednio dobrać liczbę oraz długość czujników. Potrzebne są również dodatkowe systemy przetwarzające sygnał z kilku czujników, co dodatkowo powiększa i tak już nie najniższy koszt instalacji [6]. Na podstawie publikacji [1], [8], [10] opisano podstawowe wady oraz zalety omawianych czujników kwarcowych:

Zalety:

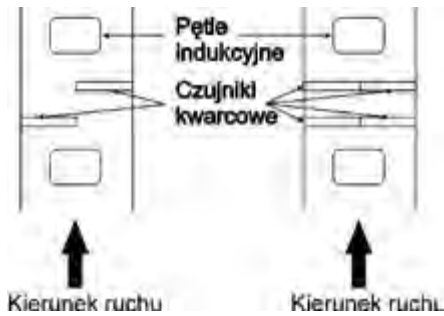
- mały wpływ temperatury na wynik pomiarów,
- stosunkowo dobra dokładność pomiaru (w granicach 10%),
- liniowa charakterystyka statyczna czujnika,
- długookresowa stabilność pomiaru.

Wady:

- wpływ toru jazdy na wyniki pomiarów,
- znaczący (ponad 20%) rozrzut wyników w zależności od prędkości jazdy,
- bardzo wysoka cena,
- skomplikowany montaż.

Dodatkowo, na podstawie publikacji [6], [10], [5] przedstawiono przykładowe możliwości montażu czujników kwarcowych (rys. 1).

Przedstawiony na rys. 1 układ składa się z zestawu pętli indukcyjnych oraz alternatywnych kombinacji rozmieszczenia czujników kwarcowych. Celem pętli indukcyjnych jest wykrywanie po-



Rys. 1. Przykładowe możliwości montażu czujników kwarcowych [5], [6], [10]
Fig. 1. Quartz sensors – example of mounting [5], [6], [10]



Rys. 3. Przykładowe możliwości montażu [7, 10]
Fig. 3. Polymer sensors – example of mounting [7, 10]

jazdu, określenie zastępczej długości elektrycznej oraz detekcja przyczepy [19]. Redundancja czujników kwarcowych pozwala na skorygowanie błędów pomiarowych, które mogą wynikać z wahań poziomych lub zmiany toru jazdy pojazdu

Polimerowe czujniki wagi

Czujniki polimerowe (zwane też piezoelektrycznymi), analogicznie do czujników kwarcowych, wykorzystują efekt piezoelektryczny prosty. Materiały polimerowe charakteryzują się większą wytrzymałością oraz elastycznością w stosunku do rozwiązań ceramicznych (kwarcowych).

Detektory piezoelektryczne montuje się na głębokości 18 mm nawierzchni jezdni, a następnie rowek wypełnia się specjalną zaprawą. Koła pojazdu nie mają bezpośredniego kontaktu z czujnikiem, dzięki czemu przetwornik nie jest narażony na uszkodzenia mechaniczne, co znacząco zwiększa jego trwałość. Z drugiej jednak strony charakterystyka materiału wypełniającego rowek oraz jego temperatura mają znaczny wpływ na dokładność pomiarów.



Rys. 2. Polimerowy czujnik piezoelektryczny
Fig. 2. Piezo polymer sensor

Długości oferowanych czujników obejmują pełen zakres (2...5,5 metrów, co 0,5 metra) i produkowane są w dwóch klasach dokładności: Class I o dokładności $\pm 7\%$ dla systemów HS-WIM oraz Class II o dokładność $\pm 20\%$ dla systemów klasyfikacji pojazdów [7].

Wady i zalety czujników polimerowych [1], [8], [10]:

Zalety:

- brak wpływu toru jazdy na wskazania,
- niska cena czujnika (około 1000 zł za metr czujnika),
- szybki i tani montaż,
- proste serwisowanie i utrzymanie instalacji,
- zwiększona trwałość oraz elastyczność czujników.

Wady:

- znaczny wpływ temperatury na wynik pomiarów,
- potrzeba częstej kalibracji systemu.

Uzyskanie wysokiej dokładności pomiarowej czujników polimerowych wymaga zastosowania częstej kalibracji systemu ze względu na wpływ temperatury na uzyskany wynik. Jednakże, biorąc pod uwagę niższy koszt oraz trwałość, czujniki polimerowe z powodzeniem mogą konkurować z rozwiązaniami opartymi o detektory kwarcowe.

Płyty ważące (Bendig Plate Scale)

W tym podejściu wykorzystuje się dwie metalowe/gumowe płyty montowane równo z powierzchnią jezdni, które odkształcają się pod wpływem nacisku przejeżdżającego pojazdu. Długość płyt wynosi około 1,75 m (6 stóp), a więc dwa czujniki mogą objąć w pełni 3,5 metrowy pas jezdni.

W zależności od typu nawierzchni (asfaltowa lub betonowa), system może zostać zamontowany w ciągu 1 dnia (gruba nawierzchnia betonowa) lub w ciągu 3 dni (asfalt lub cienka nawierzchnia betonowa). W tym drugim przypadku konieczne jest wylanie dodatkowego fundamentu w celu wzmocnienia podbudowy czujników.



Rys. 4. Przykład płyty ważącej. Fig. 4. Bending plate scale



Rys. 5. Przykładowe możliwości montażu [10]
Fig. 5. Bending plate – example of mounting [10]



Wady i zalety płyt ważących [9, 10]:

Zalety:

- duża dokładność,
- długi czas użytkowania (około 7 do 10 lat).

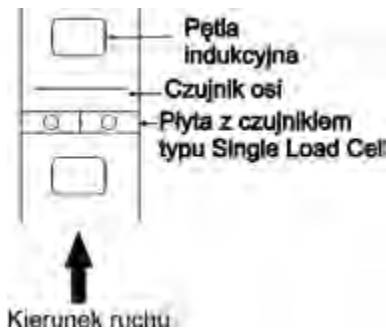
Wady:

- wysokie koszty instalacji,
- serwis wymaga dokładnego sprawdzenia wielu elementów konstrukcji, czego konsekwencją jest długi czas potrzebny na jego wykonanie,
- długi czas montażu, który dodatkowo znacząco ingeruje w nawierzchnię jezdni,
- duże ryzyko tzw. „klawiszowania”,
- ze względu na widoczność kierowcy często hamują,
- konieczność odwadniania instalacji,
- skomplikowany proces montażu.

Czujniki „Single Load Ceil”

Ten typ czujnika składa się z dwóch metalowych płyt, na których środku znajduje się cewka czuła na nacisk wywierany przez przejeżdżające pojazdy. Podobnie jak w przypadku płyt ważących, pomiar na całej szerokości typowego pasa jezdni (3,5 m) wymaga dwóch czujników.

Montaż systemu zawiera wykonanie betonowych fundamentów pod czujnikiem, a równocześnie najgłębszej (w porównaniu z pozostałymi systemami) ingerencji w drogę (około 1 metra). Dlatego też montaż systemu zajmuje około 3 dni.



Rys. 6. Przykładowe możliwości montażu [9]
Fig. 6. Single Load Ceil – example of mounting [9]

Wady i zalety czujników typu Single Load Cell [9, 10]:

Zalety:

- w chwili obecnej najdokładniejsza metoda pomiaru,
- najdłuższy czas użytkowania (można znaleźć informację o ponad 20-letnim użytkowaniu pojedynczego czujnika pomiarowego).

Wady:

- najwyższe koszty instalacji,
- serwis wymaga skrupulatnego sprawdzenia wielu elementów konstrukcji, czego konsekwencją jest długi czas potrzebny na jego wykonanie,
- długi czas montażu, który dodatkowo znacząco ingeruje w nawierzchnię jezdni,
- skomplikowany montaż, wymagający specjalistycznych narzędzi.

Czujniki optyczne

Wykorzystanie czujników optycznych do ważenia pojazdów jest podejściem stosunkowo nowym (początek lat 90. XX wieku). W metodzie tej wykorzystuje się zjawisko zmiany natężenia światła wewnątrz światłowodu pod wpływem nacisku pojazdu.

Istnieje kilka różnych podejść dotyczących zarówno typu światłowodu jak i zastosowanej metody pomiaru. Kilka przykładów proponowanych rozwiązań można znaleźć między innymi w [12, [13, 14 lub 15]. Na chwilę obecną technologia ta w przypadku zastosowań drogowych jest jeszcze na etapie badań naukowych. Wiąże się z nią jednak wiele nadziei, ponieważ rozwiązuje wiele problemów znanych z innych typów czujników WIM: niewielki wpływ temperatury na wynik pomiarów, odporność na zakłócenia elektromagnetyczne (zalecenie COST definiuje, w jakiej odległości od linii wysokiego napięcia powinna znajdować się instalacja WIM) oraz możliwość pomiarów statycznych, przy jednoczesnym zachowaniu niskich kosztów. Technologia ta znajduje już zastosowanie w detekcji pojazdów oraz pomiarów obciążenia pociągów i pojazdów przejeżdżających przez mosty – czujnik montowany jest na elementach konstrukcyjnych mostu.

Dyskusja możliwych rozwiązań

Porównanie przybliżonych kosztów instalacji i utrzymania poszczególnych typów czujników zostały przedstawione w *tab.*

Przybliżone koszty dla różnych rozwiązań WIM [10]. Approximate costs for different solutions of WIM [10]

	Single Load Cell (na pas)	Płyta ważąca (na pas)		Kwarcowy (na pas)		Piezoelektryczny (na pas)
		Pojedynczy próg	Podwójny próg	Pojedynczy próg	Podwójny próg	
Dokładność	2σ = 4–6%	2σ = 8-10%	2σ = 6-8%	2σ = 10%	2σ = 8-10%	2σ = 15–20%
Czas życia	12	7	7	4	4	3
Koszty sprzętu	160 tys. zł	63 tys. zł	111 tys. zł	60 tys. zł	120 tys. zł	6,9 tys. zł
Koszty instalacji	72 tys. zł	51 tys. zł	102 tys. zł	44 tys. zł	88 tys. zł	18 tys. zł
Roczne koszta utrzymania	5,4 tys. zł	5,4 tys. zł	10,8 tys. zł	9,9 tys. zł	19,8 tys. zł	14,3 tys. zł
Średni roczny koszt przy założeniu 12 lat użytkowania	26 tys. zł	25 tys. zł	47 tys. zł	36 tys. zł	72 tys. zł	23 tys. zł

Uwagi do tabeli:

1. przedstawione dane pochodzą z 2009 roku i są tylko przybliżone,
2. oryginalne dane wyrażone w USD, zostały przeliczone w stosunku 1:3,
3. początkowy budżet zawiera koszty materiałów instalacyjnych oraz robociznę.



Analizując powyższą tabelę można zauważyć, iż koszty instalacji systemów wykorzystujących czujniki piezoelektryczne (polimerowe) są bardzo niskie w stosunku do pozostałych rozwiązań (nawet 20-krotnie). Uśrednione roczne koszty dla poszczególnych typów czujników nie odbiegają już tak znacząco do siebie (maksymalnie 3-krotna różnica pomiędzy podwójnym czujnikiem kwarcowym, a czujnikiem piezoelektrycznym).

W tabeli nie uwzględniono czasu potrzebnego do instalacji poszczególnych systemów oraz typowych usterek. Instalacja systemów opartych na czujnikach piezoelektrycznych jest bardzo krótka, około 3 godzin na jeden pas jezdni. Z kolei instalacja systemu wykorzystującego Single Load Cell oraz płyt ważących to około 3 dni.

W roku 2000 [9] systemy wykorzystujące płyty ważące były najpopularniejszymi rozwiązaniami na świecie (ponad 700 instalacji), jednak na drugim miejscu znalazły się systemy WIM wykorzystujące czujniki piezoelektryczne (ponad 300 miejsc).

Przykładowe rozwiązanie w oparciu o czujniki piezoelektryczne

Główne przyczyny niedokładności systemów WIM i możliwości ich redukcji:

1. **pionowe wahania ważonego pojazdu** – rozwiązaniem tego problemu jest wykorzystanie większej liczby przetworników pomiarowych;
2. **zmiany czułości wzdłuż czujników** – użycie czujników niewrażliwych na ten efekt;
3. **stan nawierzchni** – okresowa kontrola stanu nawierzchni (zaleca się co 6 miesięcy) i natychmiastowa naprawa uszkodzeń w okolicach czujników pomiarowych;
4. **niedokładny montaż czujników** – staranne wykonanie wszystkich robót;
5. **temperatura nawierzchni** – wykorzystanie czujnika temperatury oraz metod autokalibracji systemu WIM.

Najtrudniejszym problemem do rozwiązania, w przypadku czujników polimerowych, jest ich znacząca wrażliwość na zmiany temperatury nawierzchni. Jednym ze sposobów kompensacji wpływu temperatury jest kalibracja systemu w oparciu o pojazd odniesienia. Jak przedstawiono w pracy [1] w tym celu można wykorzystać wybrany typ pojazdu, którego nacisk na jedną z osi charakteryzuje się najmniejszą wariancją.

Przedstawiony na rysunku schemat preselekcyjnego układu pomiarowego składa się z dwóch czujników piezoelektrycznych (dla każdego pasa jedni), pętli indukcyjnej (opcjonalnie można zastosować zestaw kilku pętli w celu zwiększenia dokładności pomiarowej), układu przetwarzającego (wysokiej klasy przetwornik A/C) oraz modułu akwizycji danych (komputer klasy PC wraz z wymaganymi modułami komunikacji np. GPRS). W zaprezentowanym rozwiązaniu kompensacja błędów pomiarowych następuje poprzez kalibrację układu względem temperatury nawierzchni oraz poprzez zastosowanie redundantnych detektorów piezoelektrycznych.



Rys. 7. Przykład systemu WIM. Fig. 7. Example of WIM system

Podsumowanie

Zaprezentowane sprzętowe rozwiązania systemów ważenia pojazdów pozwalają szacować (z właściwą dla nich dokładnością) rzeczywistą masę pojazdów. Zastosowanie określonych technologii pomiarowych może być z jednej strony zdeterminowane na gruncie formalno-prawnym do wybranej, pojedynczej metody lub grupy metod. Z drugiej strony dobór właściwych rozwiązań sprzętowych może być warunkowany przewidywanymi parametrami konkretnych aplikacji, dostosowanych do indywidualnych wymagań poszczególnych systemów.

Specjalnej uwadze warto byłoby tu poświęcić koncepcję preselekcyjnego ważenia pojazdów, celem wyłonienia on-line, bez wprowadzania poważnych utrudnień w ruchu drogowym, tych użytkowników, którzy z wysokim prawdopodobieństwem naruszają przepisy. Po automatycznym wyłonieniu z bieżącego potoku, pojazdy te podlegałyby szczegółowemu pomiarowi. Wymagania dokładności dla preselekcyjnego ważenia pojazdów pozwalają bowiem na zastosowanie systemów mniej dokładnych. Rozwiązania takie charakteryzują się przeważnie większą trwałością oraz niższym kosztem instalacji i eksploatacji. Poza wszystkim stały rozwój technologii pomiarowych pozwala domniemywać zmniejszenie w przewidywalnej przyszłości uchybów poszczególnych systemów.

Literatura

- [1] Burnos P.: Autokalibracja systemów ważących pojazdy w ruchu oraz analiza i korekcja wpływu temperatury na wynik ważenia. Rozprawa Doktorska, AGH, Kraków.
- [2] COST 323, Weigh-in-Motion of Road Vehicles, 1999.
- [3] Bernard, J.: Weigh-in-motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE). General Report. LCPC, 2001.
- [4] Technologies for Optimizing the Precision of MS-WIM of Road Transports to Improve Automatic Overload Control and European Procedures for Enforcement. 2009. <http://cordis.europa.eu/>.
- [5] Kistler: <http://www.kistler.com>.
- [6] Planning manual, Planning of a WIM station, Type 9195E, Kistler, 002-300E-07.04 (200-348e).
- [7] Roadtrax BL Traffic Sensors, Revised October 2001, Measurement Specialties Inc, Sensor Products Division, 2001.
- [8] Jiang X. et al.: Improvements in Piezoelectric Sensors and Weigh-in-Motion Data Collection Technology. 2009 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada – Transportation in a Climate of Change.
- [9] Koniditsiotis C.: Weigh-in-Motion Technology. Austroads Incorporated, Sydney, Australia. 2000.
- [10] WIM Technologies Comparison, Revision A, Date: November 1, 2009. IRD Inc.
- [11] International Recommendation: OIML R 134-1 "Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads, Part 1: Metrological and technical requirements – Tests". 2006.
- [12] Bin M., Xingu Z.: Study of Vehicle Weight-in-Motion System Based on Fiber-Optic Microbend Sensor. Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on, vol. 3, pp. 458–461, 2010.
- [13] Qu R., et al.: Optic fiber-based dynamic pressure sensor. Optical Fiber Sensors Conference, 2008. APOS '08., pp. 1–4, 2008.
- [14] Fiber Optic Weigh-In-Motion (WIM) Sensor, Uniwersytet w Illinois, <http://www.uic.edu/depts/cme/research/ssndtl/activities/4.html>.
- [15] Safaai-Jazi A. et al.: A Low-Cost Fiber Optic Weigh-In-Motion Sensor. Strategic Highway Research Program National Research Council Washington, DC, 1990.
- [16] WIM Scale Calibration: A Vital Activity for LTPP Sites, Publication No. FHWA-RD-98-104, Federal Highway Administration, McLean, 1998.
- [17] Dane wewnętrzne firmy APM
- [18] Bergan A.T., Lindgren N., Berthelot C., Woytowich B.: Preserving Highway Infrastructure Using Weigh-In-Motion (WIM). International Road Dynamics INC, Listopad 1998.
- [19] Gajda J., Sroka R., Stencel M., Żegleń T.: Identification of the mechanical object class using a single inductive loop detector. 2nd Polish – German Workshop in Mechatronic, Ilmenau, pp. 177–182, 1998.