



PIOTR BURNOS

AGH Akademia  
Górnictwo-Hutnicza  
burnos@agh.edu.pl

## Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu

### Część 3: Czujniki nacisku stosowane w systemach *Weigh In Motion (WIM)*

Systemy ważenia dynamicznego pojazdów *High Speed* i *Multi Sensor-WIM* charakteryzuje duża różnorodność strukturalna, niemniej jednak w każdym systemie można wyróżnić co najmniej trzy podstawowe elementy: czujniki nacisku, układ kondycjonowania sygnałów, oraz nadrzędny układ cyfrowy, którego przeznaczeniem jest przetwarzanie danych i sterowanie pracą systemu. Newralgicznym elementem są zainstalowane w nawierzchni jezdni czujniki nacisku, gdyż od ich właściwości w dużej mierze zależą właściwości całego systemu ważącego. W systemach *HS-WIM* i *MS-WIM* czujniki pomiarowe montuje się w nawierzchni lub pod nawierzchnią jezdni prostopadle do kierunku ruchu, w taki sposób, że osie ważonego pojazdu przetaczają się przez te czujniki [1]. Taka orientacja czujników względem osi drogi umożliwia pomiar chwilowej wartości nacisku wywieranego na nawierzchnię przez koła poruszającego się pojazdu [2]. Rozwój technolo-

gii na przestrzeni ostatnich lat oraz potrzeba budowy administracyjnych systemów *WIM* spowodowały, że do oceny nacisków osi coraz częściej stosuje się wyszukane metody bazujące na fuzji danych z czujników różnych wielkości fizycznych. Mimo to, najpopularniejsze obecnie w Europie sposoby pomiaru nacisku osi nie zmieniły się od lat i wykorzystują czujniki kwarcowe, pojemnościowe, piezoelektryczne polimerowe oraz płytowe [3], [4], [5], [6]. W tabeli 1 zestawiono zalety i wady oraz dokładności i czas eksploatacji czujników nacisku osi, które są stosowane w systemach *WIM*.

Problem oceny dokładności systemów *WIM* wyposażonych w różne technologie jest złożony, gdyż na dokładność ma wpływ wiele czynników. Stąd „dokładność” w tabeli 1 dotyczy tylko czujników i należy ją rozumieć wyłącznie jako wypadkową ich cech. Trzeba więc rozróżnić dokładność związaną z samym czujnikiem, oraz z całym systemem (na co ma wpływ

Tabela 1. Porównanie cech czujników nacisku stosowanych w systemach *WIM*

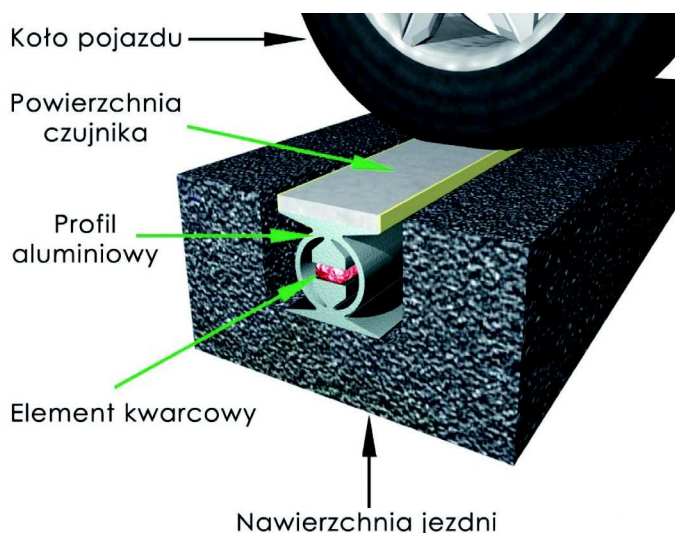
Technologia	Zalety	Wady	Dokładność	Czas eksploatacji
Czujniki kwarcowe	<ul style="list-style-type: none"><li>• Duża dokładność wyników ważenia, ze względu na dobre właściwości metrologiczne</li><li>• Mała wrażliwość na czynniki środowiskowe, w szczególności zmiany temperatury</li><li>• Pomiar w szerokim zakresie prędkości pojazdu (możliwe pomiary quasi-statyczne)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Wysoka cena czujników</li><li>• Duże koszty instalacji</li><li>• Instalacja wymaga ingerencji w nawierzchnię jezdni</li></ul>	Wysoka	10 lat
Czujniki polimerowe	<ul style="list-style-type: none"><li>• Niska cena czujników</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mała dokładność wyników ważenia, ze względu na złe właściwości metrologiczne</li><li>• Duża wrażliwość na czynniki środowiskowe, w szczególności na zmiany temperatury asfaltu</li><li>• Wiarygodny pomiar powyżej prędkości 20km/h (możliwe wyłącznie pomiary dynamiczne)</li></ul>	Niska	2 lata
Czujniki pojemnościowe	<ul style="list-style-type: none"><li>• Dobra dokładność wyników ważenia, ze względu na dużą szerokość czujników</li><li>• Dobre właściwości metrologiczne</li><li>• Czujniki przenośne</li><li>• Pomiar nacisków stałych, jak i zmiennych w czasie (możliwe pomiary statyczne)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Czujniki przenośne są podatne na uszkodzenia</li><li>• Montowane na nawierzchni są dobrze widoczne dla kierowców</li><li>• Czujniki nawierzchniowe powodują dodatkowe pionowe drgania pojazdu</li></ul>	Średnia	10 lat
Czujniki płytowe	<ul style="list-style-type: none"><li>• Dobra dokładność wyników ważenia, ze względu na dużą szerokość czujników</li><li>• Mała wrażliwość na czynniki środowiskowe, w szczególności zmiany temperatury</li><li>• Pomiar nacisków stałych, jak i zmiennych w czasie (możliwe pomiary statyczne)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Wysoka cena czujników</li><li>• Duże koszty instalacji</li><li>• Instalacja wymaga ingerencji w nawierzchnię jezdni</li></ul>	Dobra	15 lat

liczba czujników, ich konfiguracja, zastosowane algorytmy, częstotliwość kalibracji, etc.). Bardziej szczegółowe informacje na ten temat będą zawarte w czwartej części artykułu.

Największą grupę czujników nacisku stanowią czujniki wykorzystujące zjawisko piezoelektryczne proste. Odkryte w 1880 roku przez Piotra i Jakuba Curie zjawisko polega na powstawaniu ładunków elektrycznych na powierzchni dielektryka pod działaniem naprężeń mechanicznych (istnieje też zjawisko odwrotne – odkształcenie mechaniczne materiału pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego). Efekt ten jest obserwowany w materiałach o strukturze krystalicznej, bez środka symetrii, które dzieli się na piezoelektryki ceramiczne i polimerowe [7]. Najpopularniejszym materiałem piezoelektrycznym z grupy ceramików jest kwarc.

## Czujniki kwarcowe

W czujnikach tych element kwarcowy jest umieszczony w profilu aluminiowym o specjalnym kształcie, co pozwala uzyskać maksymalną czułość w kierunku prostopadłym do powierzchni czujnika, przy jednoczesnej minimalizacji czułości poprzecznej. Czujnik montuje się w wyciętej w nawierzchni jezdni szczelinie (rys. 1), która powinna być sucha i wolna od zanieczyszczeń. Wypoziomowany czujnik zalewa się chemoutwardzalną mieszkanką o właściwościach zbliżonych do nawierzchni jezdni. Taka instalacja umożliwia bezpośredni kontakt opony pojazdu z czujnikiem, co eliminuje potrzebę stosowania wypełnienia bitumicznego pośredniczącego w przenoszeniu nacisku. Dzięki temu dokładność wyników ważenia w systemach z czujnikami kwarcowymi praktycznie nie zależy od temperatury warstwy ścieralnej nawierzchni asfaltowej.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny profilu nawierzchni jezdni z zamontowanym czujnikiem kwarcowym (opracowanie własne)

Najważniejsze właściwości metrologiczne czujników kwarcowych to [8]:

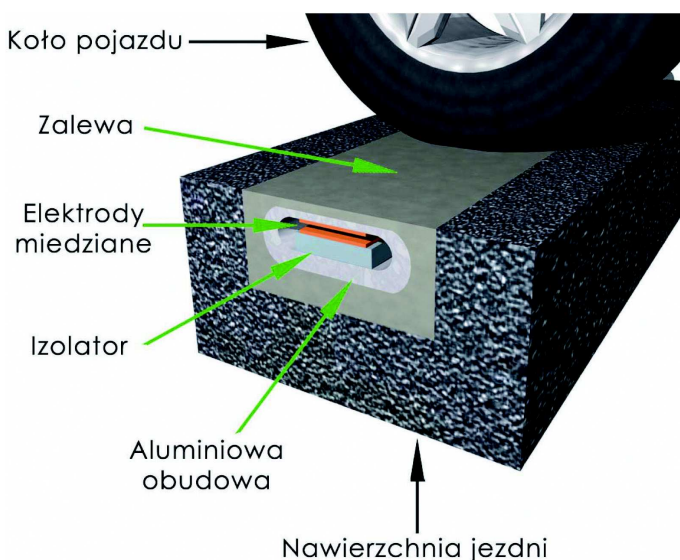
- minimalna czułość poprzeczna,
- mała wrażliwość temperaturowa ( $0.02\%/^{\circ}\text{C}$ ) oraz szeroki zakres temperatury pracy (od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $80^{\circ}\text{C}$ ),

- pomiar w szerokim zakresie prędkości pojazdu (2–120 km/h),
- mała zmienność czułości czujnika w funkcji jego długości ( $\pm 2\%$ ),
- dobra liniowość charakterystyki statycznej czujnika,
- długoterminowa stabilność czułości czujnika ( $\pm 2\%$  w okresie 30 miesięcy).

Czujniki kwarcowe charakteryzują się więc bardzo dobrymi właściwościami z punktu widzenia zastosowania w systemach WIM. Brak wrażliwości na zmiany temperatury oraz długoterminowa stabilność parametrów czujnika, przemawiają za ich zastosowaniem w systemach, w których wymagana jest duża dokładność wyników ważenia. Za zastosowaniem czujników kwarcowych przemawia również czas życia szacowany przez producenta na 10 lat. Podstawową wadą czujników kwarcowych jest wysoka cena, która wynosi około 10 tys. złotych za jeden metr czujnika.

## Czujniki pojemnościowe

Zbliżone do czujników kwarcowych właściwości użytkowe mają czujniki pojemnościowe, których podstawowym elementem jest układ dwóch elektrod wykonanych z materiału przewodzącego, odizolowanych od siebie dielektrykiem [9], [10]. Elementem konstrukcyjnym jest profil aluminiowy, który pośredniczy w przenoszeniu nacisku osi na czujnik (rys. 2). Konstrukcję takiego czujnika można więc porównać do kondensatora płaskiego o ruchomych elektrodach.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny profilu jezdni z zamontowanym czujnikiem pojemnościowym (opracowanie własne)

Nacisk wywierany przez koło pojazdu na wierzchnią ściankę profilu aluminiowego powoduje zmianę odległości między okładzinami kondensatora, a tym samym mierzalną zmianę jego pojemności. Czujniki pojemnościowe budowane są w postaci platform o szerokości od 10 do 50 cm montowanych w nawierzchni jezdni lub jako przenośne maty, które układają się na nawierzchni. Zaletą tych czujników jest, spowodowana

względnie dużą szerokością, zdolność do tłumienia (uśredniania) zakłócającego wpływu składowej zmiennej nacisku osi. Czujniki tego typu często są stosowane w wagach *LS-WIM*. Do ich głównych cech należy zaliczyć [3]:

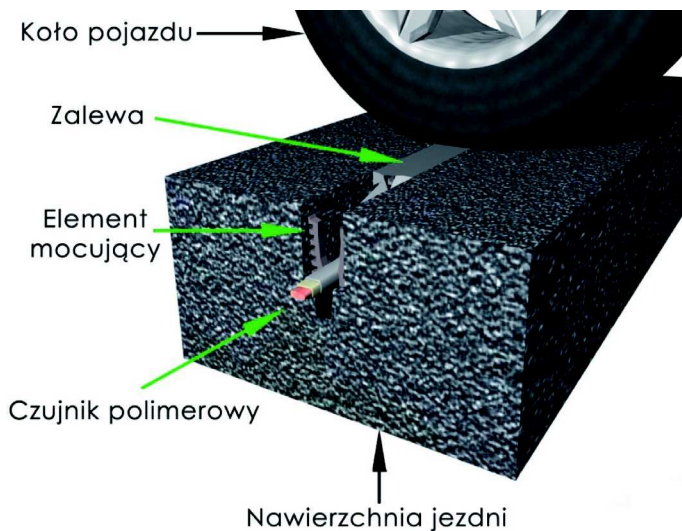
- brak reakcji na oddziaływanie sił bocznych,
- małą wrażliwość temperaturową (nie stwierdzono zależności wyniku ważenia od temperatury w zakresie od 15 do 40°C),
- pomiar nacisków stałych, jak i zmiennych w czasie (możliwe pomiary statyczne),
- małą zmienność czułości czujnika w funkcji jego długości ( $\pm 2\%$ ),
- dobrą liniowość charakterystyki statycznej czujnika.

Czujniki pojemnościowe charakteryzują się jednak małą wytrzymałością mechaniczną i szybko ulegają uszkodzeniom, co jest ich podstawową wadą.

## Czujniki polimerowe

Alternatywą do drogich czujników kwarcowych i podatnych na uszkodzenia czujników pojemnościowych są piezoelektryczne czujniki polimerowe, w skrócie nazywane piezoelektrycznymi. Ich zasada działania jest podobna do czujników kwarcowych, a zastosowanym materiałem piezoelektrycznym jest odkryty pod koniec lat 60 polimer o nazwie polifluorek winylidenu (*PVDF*) [7]. Czujniki takie są budowane w postaci:

- koncentrycznych kabli montowanych na (pomiary tymczasowe) lub pod nawierzchnią jezdni [12],
- płaskich taśm montowanych pod nawierzchnią jezdni [13],
- taśm zabudowanych w profilu metalowym w celu ułatwienia montażu i ograniczenia oddziaływania sił poprzecznych na czujnik i montowanych pod nawierzchnią jezdni [13].



Rys. 3. Przekrój poprzeczny profilu nawierzchni jezdni z zamontowanym taśmowym czujnikiem piezoelektrycznym (opracowanie własne)

Koło pojazdu nie ma bezpośredniego kontaktu z taśmowym czujnikiem polimerowym (rys. 3), a sygnał pomiarowy przenoszony jest przez nawierzchnię jezdni. To powoduje, że wyniki ważenia są bardzo wrażliwe na zmiany właściwości nawierzchni pod wpływem zmian jej temperatury. Jest to jed-

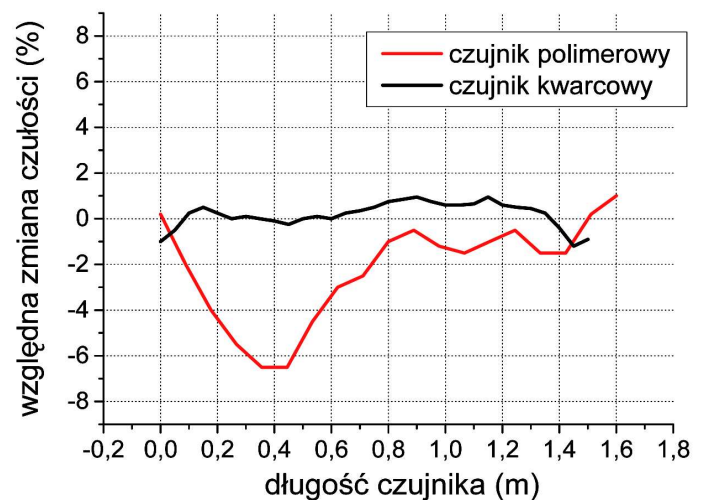
ną z głównych przyczyn małej dokładności uzyskiwanych wyników w systemach z czujnikami tego typu.

Najważniejsze cechy czujników polimerowych to [13]:

- duża wrażliwość na oddziaływanie sił bocznych, co prowadzi do zniekształcenia sygnału pomiarowego,
- duża wrażliwość na zmiany temperatury,
- pomiar wyłącznie nacisków zmiennych w czasie,
- duża niejednorodność czułości czujnika w funkcji jego długości (do  $\pm 8\%$  dla czujników klasy I oraz  $\pm 20\%$  dla czujników klasy II),
- utrata czułości czujnika pod wpływem wysokiej temperatury i oddziaływań mechanicznych.

Pomimo nienajlepszych właściwości metrologicznych, ze względu na niską cenę (wynoszącą około 1/10 ceny czujników kwarcowych w przeliczeniu na metr długości czujnika), czujniki tego typu znalazły powszechne zastosowanie. Czas eksploatacji czujników polimerowych oszacowany przez producenta wynosi 2 lata, jednak z doświadczeń autora z pracy z tego typu czujnikami wynika, że przy odpowiedniej konserwacji i kalibracji systemu są one w stanie pracować do 5 lat.

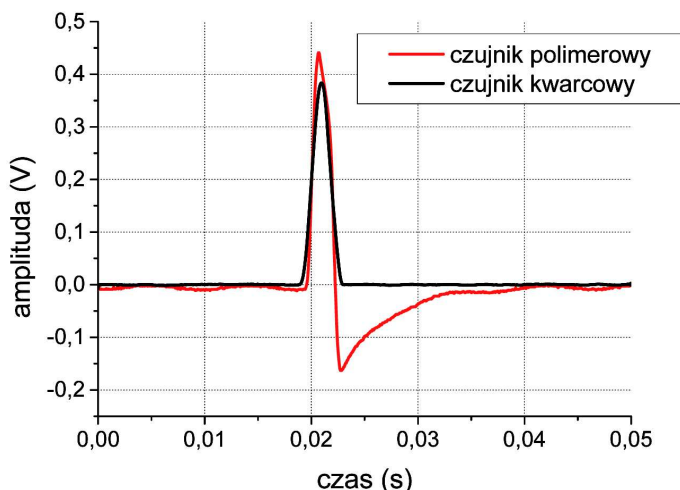
Na rysunku 4 przedstawiono względne zmiany czułości wzdłuż długości czujnika kwarcowego i polimerowego klasy I. Zmiany czułości czujnika kwarcowego nie przekraczają  $\pm 2\%$  natomiast polimerowego  $\pm 8\%$ .



Rys. 4. Względne zmiany czułości w funkcji długości czujników nacisku [8], [13]

Jadący pojazd generuje nie tylko pionowe siły nacisku na nawierzchnię. Nacisk osi wywołuje również poziome naprężenia w podłożu, co jest przyczyną zniekształcenia sygnału pomiarowego i pogorszenia dokładności wyników ważenia. Zjawisko to jest szczególnie istotne przy zastosowaniu czujników wrażliwych na tego typu oddziaływanie i może objawiać się np. powstawaniem ujemnych impulsów w rejestrowanych sygnałach pomiarowych. Porównanie sygnałów pomiarowych, generowanych przez czujniki kwarcowe i polimerowe przedstawiono na rysunku 5.

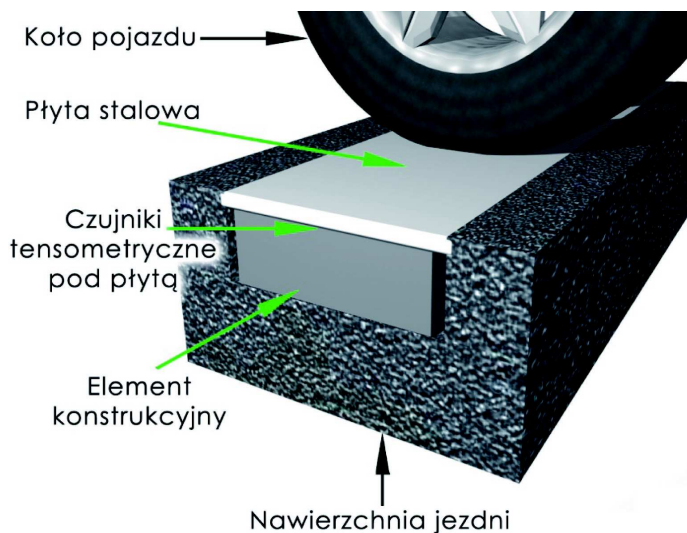
Dzięki zastosowaniu specjalnego profilu aluminiowego w czujniku kwarcowym, uzyskano minimalizację czułości na oddziaływanie sił poprzecznych i brak zniekształceń sygnału pomiarowego.



Rys. 5. Sygnały generowane pod wpływem nacisku osi przez czujniki WIM (opracowanie własne)

## Czujniki płytowe

Głównym elementem konstrukcyjnym są dwie płyty stalowe instalowane w nawierzchni jezdni jedna obok drugiej (rys. 6) – każda mierzy nacisk jednego koła. Na płycie zainstalowane są czujniki tensometryczne, które mierzą odkształcenia wywołane naciskiem osi poruszającego się pojazdu.

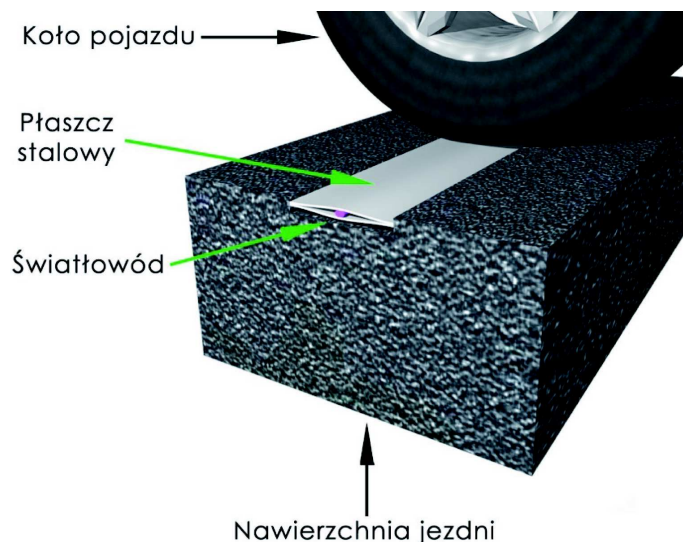


Rys. 6. Przekrój poprzeczny profilu nawierzchni jezdni z zamontowanym czujnikiem płytowym (opracowanie własne)

Podobnie jak w przypadku czujników pojemnościowych, zaletą tych czujników jest, spowodowana dużą szerokością, zdolność do tłumienia (uśredniania) zakłócającego wpływu składowej zmiennej nacisku osi. Trwałość czujników płytowych jest jednak dużo większa niż pojemnościowych, a dobrze zamontowane mogą pracować przez kilkanaście lat. Ze względu na to, że czujniki te mierzą również siły stałe w czasie, często są stosowane w wagach statycznych lub wolno- przejazdowych LS-WIM.

## Czujniki światłowodowe

Względnie nową grupą czujników w zastosowaniu do dynamicznego ważenia pojazdów są czujniki światłowodowe [14]. Wykorzystano w nich zjawisko zmiany warunków propagacji fali świetlnej wewnątrz światłowodu pod wpływem działania siły zewnętrznej. Włókno światłowodowe umieszczone jest w ochronnym korpusie, który jednocześnie przenosi nacisk osi na światłowód. Czujniki tego typu są montowane w wyfrezowanej w nawierzchni jezdni szczelinie. Przykładową konstrukcję i montaż czujnika światłowodowego przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Przekrój poprzeczny profilu nawierzchni jezdni z zamontowanym czujnikiem światłowodowym

Ze względu na zasadę działania czujniki światłowodowe dzieli się na:

- amplitudowe,
- interferometryczne,
- polaryzacyjne,
- wykorzystujące efekt *Bragga*.

W czujnikach polaryzacyjnych wykorzystano zjawisko zmiany kąta polaryzacji fali świetlnej pod wpływem naprężeń mechanicznych w światłowodzie [15]. Źródłem światła jest laser, a elementem światłoczułym fotodiody połączone z nadrzędnym układem kondycjonowania i przetwarzania sygnałów. Główne cechy czujników światłowodowych to:

- mała wrażliwość na zmiany temperatury,
- pomiar nacisków stałych, jak i zmiennych w czasie (możliwe pomiary statyczne),
- duża odporność na zakłócenia elektromagnetyczne.

Prace badawcze nad powszechnym zastosowaniem tych czujników w systemach WIM są w trakcie realizacji.

## Podsumowanie

Czujniki nacisku osi to niewrażliwy element systemów WIM i od ich właściwości metrologicznych zależą właściwości całego systemu pomiarowego. Ze względu na różniczo-

Tabela 2. Zestawienie cech i kosztów instalacji i utrzymania systemów

Technologia	Dokładność	Zakres prędkości	Cena czujników	Koszt instalacji	Koszt utrzymania
Czujniki kwarcowe	Wysoka	2–120 km/h	Wysoka	Wysoki	Średni
Czujniki polimerowe	Niska	20–120 km/h	Niska	Średni	Wysoki
Czujniki pojemnościowe	Średnia	0–120 km/h	Średnia	Niski	Niski
Czujniki płytowe	Wysoka	0–120 km/h	Wysoka	Wysoki	Niski

wane cechy czujników, kryterium ich doboru powinno być wielowymiarowe i musi obejmować co najmniej:

- zakres prędkości ważonego pojazdu,
- docelową dokładność wagi,
- cenę,
- koszty instalacji czujników,
- koszty utrzymania i obsługi systemu,
- metodę i częstotliwość kalibracji systemu,
- natężenie ruchu na stanowisku ważącym.

Należy pamiętać, że koszty utrzymania i konserwacji systemu w niektórych przypadkach mogą przewyższać koszt zakupu czujników nacisku. Na przykład czujniki kwarcowe, a w szczególności polimerowe, wymagają częstej, okresowej kalibracji. Koszt takiego jednorazowego przedsięwzięcia waha się od kilkunastu do kilkudziesięciu tysięcy złotych. W tabeli 2 zamieszczono zestawienie cech i kosztów instalacji i utrzymania systemów.

Popularne w latach 90. czujniki płytowe i tanie czujniki polimerowe obecnie są wypierane z rynku przez czujniki kwarcowe o znacznie lepszych właściwościach metrologicznych. Mała wrażliwość temperaturowa tych czujników, mała zmienność czułości czujnika w funkcji długości oraz brak wrażliwości na oddziaływanie sił poprzecznych to zalety usprawiedliwiające duże nakłady finansowe potrzebne na zakup takich czujników. Zastosowanie czujników polimerowych jest tanią alternatywą dla czujników kwarcowych, jednak „kosztem” jest mała dokładność wyników ważenia. Ponadto ze względu na dużą wrażliwość temperaturową takich czujników, szczególnej uwagi wymaga wybór metody kalibracji systemu oraz jej częstotliwość. W kolejnej, czwartej części artykułu, zostaną porównane właściwości metrologiczne systemów WIM wyposażonych w obydwa rodzaje czujników oraz zostaną opisane czynniki mające wpływ na dokładność wyników ważenia.

Czujniki nacisku osi są rozwijane od ponad 50 lat. Rozwój technologii umożliwił wykorzystanie materiałów piezoelektrycznych na dużą skalę i skonstruowanie dokładnych czujników kwarcowych. Od lat 90. trwają prace nad czujnikami światłowodowymi i chociaż na rynku dostępne są produkty komercyjne, to nie znalazły one szerokiego zastosowania.

Należy się spodziewać, że w przyszłości główny nacisk będzie położony na opracowanie czujników o jeszcze lepszych właściwościach metrologicznych z przeznaczeniem do stosowania w systemach administracyjnych. Jednocześnie czujniki przyszłości powinny charakteryzować się dużą niezawodnością i czasem eksploatacji oraz stabilnością parametrów i odpornością na wpływ czynników zakłócających. To z kolei pozwoli ograniczyć koszty związane konserwacją i kalibracją systemu ważącego.

#### Bibliografia

- [1] P. Burnos et al., *Road traffic parameters measuring system with variable structure*. Metrology and Measurement Systems: quarterly of Polish Academy of Sciences 2011 vol. 18 no. 4, 2011, s. 659–666
- [2] P. Burnos, *Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu. Część 2. Podział i charakterystyka systemów Weigh In Motion*. Drogownictwo 7-8/2014
- [3] J. Gajda, R. Sroka, M. Stencel, T. Żegleń, P. Burnos, P. Piwowar, *Pomiary parametrów ruchu drogowego*. Kraków, Wydawnictwa AGH, 2012
- [4] L. Klein, *Sensor Technologies and Data Requirements for ITS*. Artech House, 2001
- [5] R. Sroka, *Multisensing in Road Traffic Measurements*. Multisensor Fusion, 2002, s. 725 - 747
- [6] L.E. Mimbela, L. Klein, *A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems*. FHWA, 2007
- [7] Materiały inteligentne. 2014. <http://www.matint.pl/>. (data uzyskania dostępu: czerwiec 2014)
- [8] Kistler. 2014. <http://www.kistler.com/> (data uzyskania dostępu: czerwiec 2014)
- [9] D. Cebon, D. Cole, *Capacitive Strip Sensor for Measuring Dynamic Tyre Forces* Second International Conference on Road Traffic Monitoring, Conf. Publ. No. 299, Londyn, 1989
- [10] D. Cebon, D. Cole, *Performance and Application of a Capacitive Strip Tyre Force Sensor*, Proceedings of the 6th Conference on Road Traffic Monitoring and Control, Londyn, 1992
- [11] J. Gajda, R. Sroka, M. Stencel, A. Wajda, T. Żegleń, *Systemy Wążeń Pojazdów Samochodowych w Ruchu*. Drogownictwo, marzec 2001
- [12] Thermocoax. 2014. <http://www.thermocoax.com/> (data uzyskania dostępu: 2014)
- [13] Measurement Specialties. 2014. <http://www.meas-spec.com/>. (data uzyskania dostępu: czerwiec 2014)
- [14] R. Malla, A. Sen, N. Garrick, *A Special Fiber Optic Sensor for Measuring Wheel Loads of Vehicles on Highways*, Sensors, 2008, s. 2551–2568
- [15] J.M. Caussignac, J.C. Rougier, *Fibre Optic WIM Sensor and Optoelectronic System – Preliminary Tests*. Proceedings of the Final Symposium of the project Wave (1996–99), Paryż: Hermes Science Publication, 1999

## Z serwisu GDDKiA

### Kolejny odcinek S8 w województwie łódzkim oddany do ruchu

8 sierpnia 2014 r. oddano do ruchu 8,15-kilometrowy odcinek drogi ekspresowej S8 węzeł Łask-węzeł Róża. Nowo oddany fragment jest kolejnym (6) odcinkiem realizacyjnym budowy drogi ekspresowej S8 na odcinku węzeł Wieluń-węzeł Łódź Południe.

Dzięki nowemu fragmentowi trasy zostanie poprawiona nie tylko lokalna komunikacja, ale także będzie on alternatywą dla uciążliwego tranzytu samochodów ciężarowych między Łaskiem a Piotrkowem Trybunalskim

(Kącik-Mzurki). Nowa trasa jest w standardzie drogi ekspresowej, ma dwie jezdnie po dwa pasy ruchu szerokości 3,5 m każdy oraz pas awaryjny o szerokości 2,5 m. Nowo oddany odcinek ma nawierzchnię betonową znacznie trwalszą od tradycyjnych nawierzchni asfaltowych.

Koszt budowy nowego odcinka wyniósł nieco ponad 550 mln złotych (łącznie z odcinkiem 7 oddanym do ruchu wiosną tego roku).

(TS)