

PIOTR BURNOS

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

Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu

Część 4: Ocena dokładności systemów *Weigh In Motion (WIM)*

W początkowym okresie rozwoju systemów *WIM* uważano, że jedyną przyczyną dużej niedokładności uzyskiwanych wyników ważenia leży po stronie pojazdu i wynika ze zmienności nacisku osi na podłoże. Bardziej wnikliwe badania wykazały jednak, że istnieje szereg czynników dodatkowych zakłócających pomiar [9]. Można je podzielić, ze względu na źródło pochodzenia, na związane z pojazdem oraz z samym systemem. Dodatkowo współczesne systemy ważące pojazdy samochodowe w ruchu są bardzo różnicowane pod względem konstrukcyjnym. W grupie tych systemów można wyróżnić: *Low-Speed WIM*, *High-Speed WIM*, *Multi-Sensor WIM* [1], a każdy z rodzajów systemu może być wyposażony w czujniki wykonane w różnych technologiach takich jak: polimerowe, kwarcowe, płytkowe-tensometryczne, pojemnościowe czy światłowodowe [2]. Ta różnorodność powoduje, że jednolite opisanie właściwości metrologicznych systemów *WIM* nie jest zadaniem łatwym, a dokładność ważenia w różnych konfiguracjach „rodzaj systemu”/”rodzaj czujników” jest inna i w różnym stopniu zależy od czynników wpływających na dokładność ważenia. System tego samego rodzaju, o tej samej strukturze, ale wyposażony w czujniki wykonane w różnych technologiach, np. kwarcowe i polimerowe, będzie miał skrajnie różne właściwości ze względu na wpływ zmian temperatury nawierzchni na dokład-

ność uzyskiwanych wyników. Z kolei dwa systemy zbudowane na podstawie tego samego rodzaju czujników, ale o różnej liczbie, będą mniej lub bardziej „odporne” na wpływ składowej dynamicznej nacisku osi na wyniki ważenia. Spoglądając jednak na rodzinę systemów *WIM* z metrologicznego punktu widzenia, można wyróżnić wspólną grupę czynników, które w mniejszym lub większym stopniu wpływają na dokładność ważenia we wszystkich grupach rodzajowych systemów ważących. W tabeli 1 przedstawiono syntetyczne ujęcie tych czynników z podziałem ze względu na źródło ich występowania i ze względu na ich znaczenie.

Czynniki wyszczególnione w tabeli 1 jako główne, mają ilościowo największy wpływ na dokładność uzyskiwanych wyników ważenia w systemach *WIM*. Na przykład minimalizacja niekorzystnego wpływu dużej amplitudy składowej dynamicznej nacisku osi, zmian prędkości pojazdu, wpływu temperatury oraz odpowiedni dobór rodzaju i liczby czujników nacisku skutkuje zwiększeniem dokładności uzyskiwanych rezultatów. Pozostałe czynniki nie wywierają istotnego wpływu na dokładność, stąd też zostały zakwalifikowane do kategorii „dodatkowe”. Ilościowe określenie ich zakłócającego wpływu na wyniki jest trudne i brak jest dokładnych informacji w dostępnej literaturze na ten temat.

Łączne oddziaływanie czynników zakłócających powoduje, że obecnie stosowane systemy *WIM* wyposażone w dwa kwarcowe czujniki nacisku umożliwiają pomiar masy całkowitej

Tabela 1. Czynniki niekorzystnie wpływające na dokładność ważenia systemów *WIM*

Czynniki związane z pojazdem	Czynniki związane z systemem
Główne	
Pionowe wahania pojazdu mające wpływ na amplitudę składowej dynamicznej nacisku osi (zależne od: jakości drogi, prędkości pojazdu, parametrów jego zawieszenia, masy całkowitej oraz rodzaju ogumienia i ciśnienia w oponach)	Kategoria nawierzchni rozumiana jako jej jakość (zależna od: geometrii drogi, jakości materiałów użytych do budowy drogi, etc.)
Zmiana prędkości pojazdu na stanowisku ważącym (zależna od: czynnika ludzkiego, ukształtowania terenu, oznakowania)	Liczba zastosowanych czujników nacisku (zależna od: pożądanej dokładności wyników ważenia, dostępnych środków finansowych)
	Rodzaj zastosowanych czujników nacisku oraz ich klasa (zależne od: przeznaczenia systemu ważącego (administracyjny, preselekcyjny), dostępnych środków finansowych)
	Zmiana temperatury nawierzchni oraz jej gradient wzdłuż stanowiska <i>WIM</i> (zależne od: warunków klimatycznych, zacienienia drogi)
Dodatkowe	
Efekt windy powietrznej (np. odciążanie przodu pojazdu) – tylko przy ocenie nacisków osi (zależny od: prędkości wiatru, prędkości pojazdu i jego sylwetki)	Przestrzenna powtarzalność nacisku osi (zależna od: profilu jezdni na ścieżce przejazdu pojazdów przez stanowisko <i>WIM</i>)
Konfiguracja osi – problem przy wyznaczaniu nacisków osi składowych osi wielokrotnej (zależne od: czasu relaksacji nawierzchni drogi i czujników nacisku)	Czas relaksacji nawierzchni drogi i czujników nacisku (zależne od właściwości materiałów użytych do budowy drogi)
	Niepewność pomiaru prędkości pojazdu (zależna od: metody pomiaru prędkości, dokładności montażu czujników i ich właściwości)
	Dokładność kalibracji systemu

tej pojazdu na poziomie około 10% (a nacisków osi na poziomie kilkunastu procent). Determinuje to zastosowanie tych systemów wyłącznie w celach preselekcyjnych (kiedy współpracują ze stacjami ważenia statycznego), bez możliwości ich bezpośredniego zastosowania w celach administracyjnych.

Metodyka badań i oceny dokładności systemów WIM

Charakterystyczną cechą wag dynamicznych jest to, że nawierzchnia jezdni jest integralną częścią systemu pomiarowego. Z tego powodu, oprócz elementów samego systemu, również właściwości fizyko-mechaniczne oraz równość i sztywność nawierzchni mają wpływ na dokładność uzyskiwanych wyników ważenia. Sprawia to trudność w prowadzeniu badań eksperymentalnych, gdyż muszą być one wykonywane w miejscu zainstalowania systemu WIM, podczas normalnego ruchu drogowego.

W takich warunkach do oceny dokładności wyników ważenia można zastosować pojazd oprzyrządowany bądź metodą pojazdów wstępnie zważonych. Pojazd oprzyrządowany wyposażony jest w system „samoważenia”, dzięki wyposażeniu go w specjalistyczną aparaturę pomiarową. Możliwa jest ciągła estymacja chwilowej wartości siły nacisku wywieranej przez oś na podłoże [15]. Porównanie wyników z pojazdu oprzyrządowanego z wynikami z systemu WIM umożliwia ocenę dokładności wyników ważenia dynamicznego. Koszty budowy, eksploatacji i kalibracji takiego pojazdu są jednak bardzo wysokie (rzędu setek tysięcy euro) i z tego powodu metoda ta jest rzadko stosowana w praktyce. Dużo bardziej powszechna jest metoda pojazdów wstępnie zważonych, która polega na porównaniu dokładnych wyników ważenia pojazdów na węgach stacjonarnych z wynikami ważenia tych pojazdów na wadze WIM [13]. Pojazdów takich powinno być kilka, o różnych masach całkowitych i powinny one wielokrotnie przejeżdżać przez stanowisko ważące z różnymi prędkościami. Obydwie metody są więc trudne do praktycznej realizacji ze względów logistycznych; są czasochłonne, a przede wszystkim kosztowne. Ponadto pewne rodzaje badań nie są możliwe do realizacji w praktyce, jak np. ocena dokładności tego samego systemu na drogach o różnej równości nawierzchni.

W niniejszym artykule zaprezentowano alternatywne podejście do oceny dokładności wyników ważenia w systemach ważenia dynamicznego, polegające na przeprowadzeniu symulacji w środowisku obliczeniowym *Adams/Car* [16] oraz na wykorzystaniu modelu systemu WIM. W świetle wymienionych wcześniej wad metody pojazdu oprzyrządowanego i pojazdów wstępnie zważonych, badania symulacyjne mają trzy istotne zalety, gdyż pozwalają na:

- uzyskanie wyników w czasie będącym ułamkiem czasu potrzebnego na wykonanie badań na drodze,
- obniżenie kosztów badań (jednorazo-

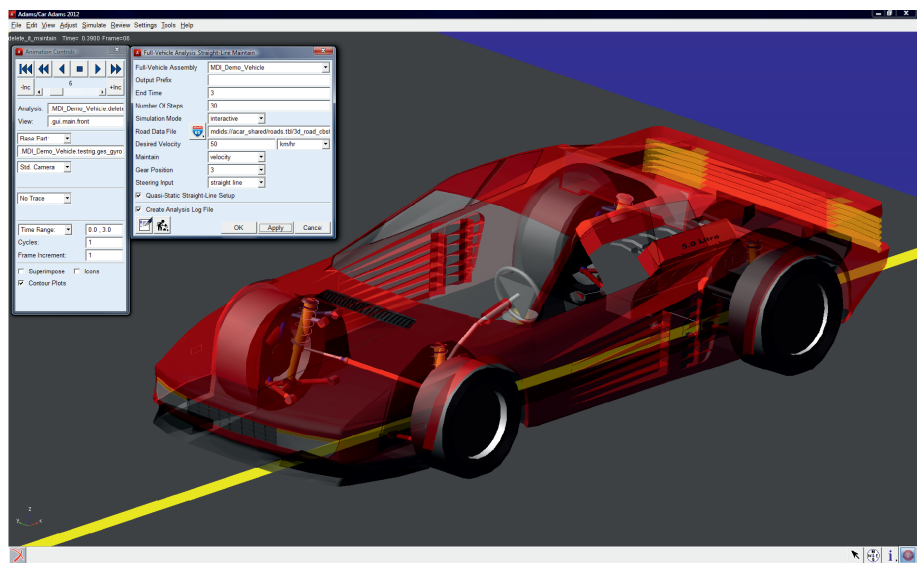
wy koszt zakupu oprogramowania zwraca się po wykonaniu dwóch symulacji w stosunku do metody pojazdów wstępnie zważonych),

- ocenę wpływu wszystkich czynników zakłócających na dokładność wyników ważenia, systemów WIM o dowolnej konfiguracji (co jest niemożliwe do przeprowadzenia na drodze).

Wadą badań symulacyjnych jest ograniczona wiarygodność wyników skorelowana z jakością zastosowanych modeli. Aby ograniczyć ten czynnik ryzyka, symulację dynamicznego ważenia pojazdów przeprowadzono w środowisku *Adams/Car* firmy *MSC Software* [16]. Jest to wiarygodne i popularne wśród producentów pojazdów oprogramowanie do symulacji dynamiki pojazdów (*Multibody Dynamic MBD*) oraz do badania złożonych oddziaływań pomiędzy pojazdami a nawierzchnią jezdni. *Adams/Car* daje inżynierom możliwość budowania modeli nie tylko pojazdów oraz dróg o różnej kategorii, ale także umożliwia symulację dowolnych przejazdów pojazdów (od prostoliniowego ruchu jednostajnego po symulację poślizgu na łuku drogi przy wyłączeniu systemu ABS w pojeździe). Jest to więc kompleksowe narzędzie typu *MBD*, a o wiarygodności uzyskiwanych za jego pośrednictwem wyników świadczy to, że *Adams/Car* jest wykorzystywany przez wszystkie niemal koncerny samochodowe do projektowania i testowania prototypów nowych pojazdów. Na rysunku 1 przedstawiono interfejs użytkownika programu *Adams/Car* z przykładowym modelem pojazdu.

Dane symulacyjne, będące podstawą oceny wpływu czynników zakłócających na dokładność systemu WIM pozyskano w następujący sposób:

- zasymulowano kilkusetmetrowy przejazd pojazdu dwuosiowego z różnymi prędkościami (od 40 do 90 km/h) na drogach o różnej kategorii (jakości),
- rejestrowano chwilowe wartości nacisku każdego koła pojazdu na podłoże,
- do każdej konfiguracji prędkość pojazdu – kategoria drogi, wykonano ważenie pierwszej osi pojazdu na wirtualnym stanowisku WIM, o wybranej liczbie czujników (od 2 do 40),



Rys. 1. Interfejs użytkownika programu *Adams/Car* z przykładowym modelem pojazdu i drogi

- ze względu na to, że wyniki ważenia mają charakter losowy, ocena dokładności musi mieć charakter statystyczny – w tym celu ważenie powtórzono 100 razy, za każdym razem losując położenie systemu *WIM* na ścieżce przejazdu wirtualnego pojazdu (z rozkładem równomiernym).

Tam, gdzie było to możliwe i uzasadnione, dokładność oceniono na podstawie danych pomiarowych z systemu *MS-WIM*, zainstalowanego na drodze krajowej nr 81 w miejscowości Gardawice, zaprojektowanego i zbudowanego przez pracowników Katedry Metrologii i Elektroniki AGH w Krakowie [3].

Do oceny dokładności wyników ważenia użyto dwóch, powiązanych ze sobą kryteriów:

- charakterystyki niezawodności $\Phi(\delta)$ [3], [4] zdefiniowanej zależnością (1):

$$\Phi(\delta) = 1 - P(\delta) \quad (1)$$

w której:

- δ – względny błąd pomiaru masy całkowitej lub nacisku statycznego osi w badanym systemie *WIM*,
- $P(\delta)$ – dystrybuanta błędu δ ,
- względnego błędu 95-procentowego $\delta_{95\%}$.

Charakterystyka niezawodności opisuje prawdopodobieństwo wystąpienia błędu o wartości większej niż wartość argumentu tej charakterystyki. Natomiast względny błąd 95-procentowy jest zdefiniowany jako wartość, poniżej której występują błędy obliczone dla 95% przeprowadzonych eksperymentów. Pomiędzy błędem $\delta_{95\%}$ i charakterystyką niezawodności $\Phi(\delta)$ istnieje oczywisty związek, a mianowicie taki, że błąd $\delta_{95\%}$ jest taką wartością argumentu, dla której $\Phi(\delta_{95\%})=0,05$.

Pionowe wahania pojazdu i jakość nawierzchni

Jedną z głównych przyczyn małej dokładności uzyskiwanych wyników ważenia w systemach *WIM* są pionowe wahania pojazdu, objawiające się tym, że w nacisku osi na nawierzchnię oprócz składowej statycznej występuje również komponent dynamiczny [1], [6]. O ile składowa statyczna wywołana jest grawitacją i można ją z łatwością wyznaczyć w przypadku nieruchomego pojazdu, o tyle składowa dynamiczna jest charakterystyczna dla pojazdów w ruchu, jej amplituda zależy od wielu czynników i jej występowanie zakłóca proces estymacji składowej stałej. Chwilowy nacisk osi pojazdu można opisać zależnością (2):

$$p(t) = p_0 + P(t) \quad (2)$$

w której:

- $p(t)$ – chwilowa wartość nacisku osi na podłoże,
- p_0 – składowa stała – nacisk statyczny osi,
- $P(t)$ – składowa zmienna – nacisk dynamiczny osi.

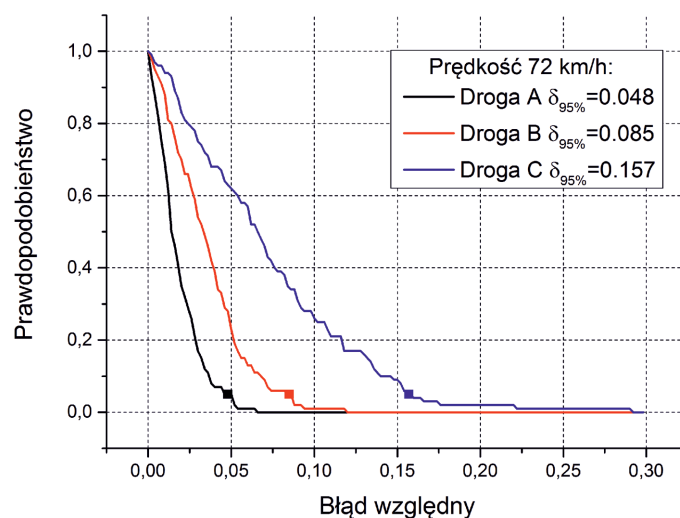
Amplituda komponentu dynamicznego może w skrajnych przypadkach osiągać wartość 40% wartości składowej stałej nacisku. Innymi słowy, przy zastosowaniu tylko jednego czujnika w systemie, wynik ważenia mógłby być zawyżony bądź zaniżony o taką wartość.

Wpływ kategorii (stanu technicznego) nawierzchni jezdni

Czynniki związane z jezdnią, które bezpośrednio wpływają na dynamikę pojazdu to:

- równość i nośność nawierzchni,
- profil jezdni (równość poprzeczna, podłużna, etc),
- uszkodzenia nawierzchni (spękania, wyboje, etc).

Dodatkowe znaczenie mogą mieć niejednorodności pojawiające się okresowo takie jak: zalegający śnieg, lód i piasek. Odpowiednia lokalizacja stanowiska *WIM* oraz właściwości nawierzchni mają więc istotny wpływ na zachowanie pojazdu będącego w ruchu i na chwilową wartość nacisku osi, która podlega pomiarowi. Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki niezawodności obrazujące tę sytuację, wyznaczone na podstawie danych symulacyjnych pochodzących z programu *Adams/Car*. Pod uwagę brano wynik ważenia jednej osi. Charakterystyki zostały wyznaczone dla trzech identycznych dwuczujnikowych systemów *WIM*, zainstalowanych na drogach o różnej kategorii (wynik ważenia był obliczany jako średnia arytmetyczna dwóch próbek nacisku). W normie [14] zdefiniowano 8 kategorii jakości drogi wyznaczanych na podstawie gęstości widmowej mocy pionowych nierówności nawierzchni jezdni. Kategorie te oznaczono literami od A do H, gdzie A to droga o bardzo dobrej jakości. Aby zbadać wyłącznie wpływ kategorii drogi na wynik ważenia założono, że w systemie nie występują żadne dodatkowe błędy (powodowane np. niejednorodną czułością czujników, wpływem temperatury, etc.).



Rys. 2. Charakterystyki niezawodności systemu dwuczujnikowego, wyznaczone dla nacisku pierwszej osi pojazdu poruszającego się z prędkością 72 km/h po drogach o kategoriach A, B i C

Na podstawie wyznaczonych charakterystyk można sformułować następujące wnioski:

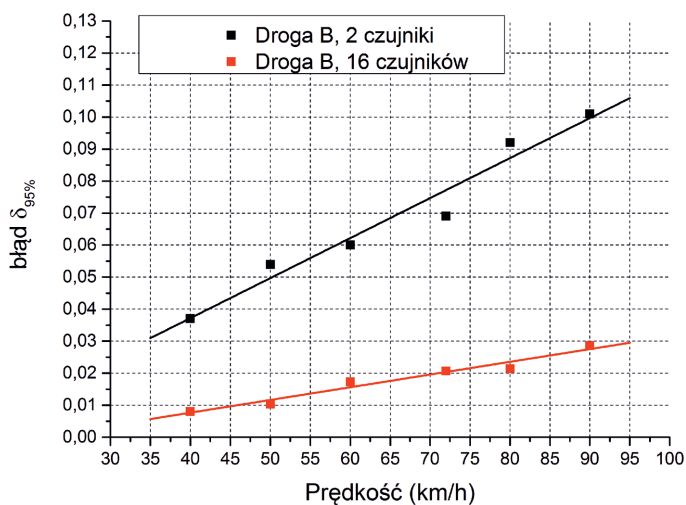
- przy założeniu, że w systemach nie występują żadne dodatkowe błędy ważenia, niepewność pomiaru spowodowana pionowymi wahaniami pojazdu w istotny sposób zależy od kategorii drogi, na której zainstalowany jest system,
- zgodnie z intuicją, największa wartość błędów $\delta_{95\%}$ występuje dla systemu zainstalowanego na drodze o najgorszej kategorii C, a najmniejsza na drodze o kategorii A,

- pomimo instalacji systemu na drodze o bardzo dobrej jakości A, w systemie 2-czujnikowym nie da się osiągnąć większej dokładności ważenia niż 4,8% (ocenianej miarą błędu $\delta_{95\%}$).

Innymi słowy, im droga jest bardziej zniszczona, tym zmienność nacisku osi poruszającego się pojazdu jest większa, a dokładność ważenia dynamicznego mniejsza. Z tego powodu, zgodnie z zaleceniami raportu COST323 [13], systemy WIM powinny być budowane na drogach nowych o kategorii A. Idealne stanowisko ważące to prosty odcinek drogi bez nachyleń podłużnych i poprzecznych o nawierzchni płaskiej bez nierówności. Hipotetycznie, pojazd poruszający się po takiej drodze ze stałą prędkością wywierałby niezmienny nacisk na nawierzchnię równy składowej stałej wywołanej przez grawitację.

Wpływ prędkości pojazdu

Amplituda składowej dynamicznej nacisku osi zależy również od prędkości pojazdu, właściwości jego zawieszenia oraz cech użytego ogumienia i ciśnienia w oponach. Na rysunku 3 przedstawiono zależność błędu $\delta_{95\%}$ w funkcji prędkości pojazdu z dwóch systemów WIM: 2 i 16-czujnikowego, zainstalowanych na drodze o średniej jakości B. Założono, że pionowe wahaniasa pojazdu są jedyną przyczyną błędów ważenia.



Rys. 3. Zależność błędu $\delta_{95\%}$ od prędkości ważonego pojazdu na drodze o kategorii B

Z analizy wyników zaprezentowanych na rysunku 3 można wyciągnąć następujące wnioski:

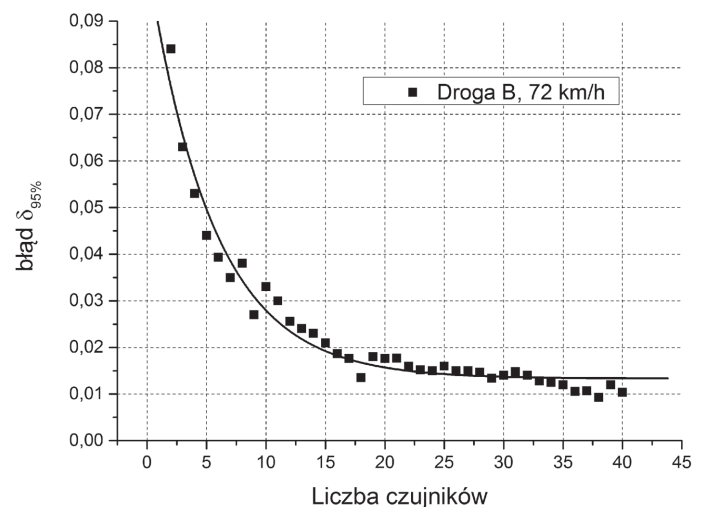
- im większa prędkość pojazdu, tym błędy ważenia dynamicznego są większe niezależnie od liczby zastosowanych w systemie czujników, przy czym zależność ta ma charakter liniowy,
- wraz z prędkością pojazdu błąd $\delta_{95\%}$ rośnie szybciej w przypadku systemu 2-czujnikowego niż systemu 16-czujnikowego,
- ograniczenie niekorzystnego wpływu składowej dynamicznej nacisku osi na wyniki ważenia można uzyskać poprzez ograniczenie prędkości na stanowisku ważącym.

Czynnikiem będącym poza kontrolą projektanta stanowiska WIM jest rodzaj i stan techniczny zawieszenia pojazdu oraz rodzaj zastosowanego w pojeździe ogumienia. Zawieszenie będące w złym stanie technicznym, które nie amortyzuje należycie nierówności jezdni, powoduje dodatkowe zwiększenie pionowych wahań pojazdu, a w konsekwencji wzrost wartości błędów pomiarowych.

Wpływ liczby czujników nacisku

Inną drogą prowadzącą do minimalizacji wpływu składowej dynamicznej nacisku osi na dokładność ważenia jest zwiększenie liczby czujników w systemie, zebranie większej liczby próbek nacisku i ich algorytmiczna obróbka. Systemy o liczbie czujników większej niż dwa, nazywane są *Multi-Sensor WIM*. Jeżeli pojazd porusza się ze stałą prędkością, a czujniki systemu *MS-WIM* są równoodległe od siebie, to próbki sygnału nacisku pobierane są w stałych odstępach czasu (próbkiwanie równomierne). W takim przypadku nacisk statyczny jest obliczany jako wartość średnia z zebranych próbek, chociaż możliwe jest zastosowanie innych estymatorów [12]. Z drugiej strony, z ekonomicznego punktu widzenia, należy minimalizować liczbę czujników.

Na rysunku 4 przedstawiono zależność błędu $\delta_{95\%}$ w funkcji liczby czujników, dla drogi o kategorii B i pojazdu poruszającego się z prędkością 72 km/h.



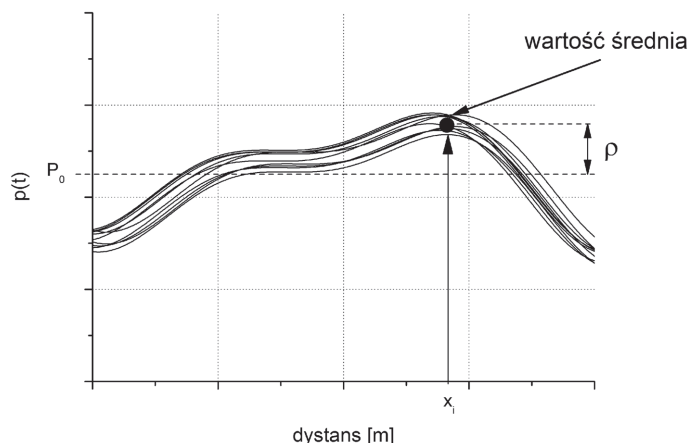
Rys. 4. Zależność błędu $\delta_{95\%}$ od liczby czujników systemu WIM na drodze o kategorii B, dla pojazdu poruszającego się z prędkością 72 km/h

Charakterystyka z rysunku 4 prowadzi do dosyć oczywistego wniosku: „im więcej czujników w systemie, tym lepiej”, przy czym największa korzyść wynikająca ze zwiększania ich liczby występuje do 16 czujników nacisku. Dalsze zwiększanie liczby czujników nie przynosi istotnej poprawy dokładności ważenia, a tym samym jest nieuzasadnione ekonomicznie.

Wpływ przestrzennej powtarzalności nacisku osi

Dodatkowym czynnikiem wpływającym negatywnie na dokładność ważenia, również związanym z profilem jezdni jest przestrzenna powtarzalność nacisku osi. Otóż, przy wie-

lokrotnym przejeździe tego samego pojazdu przez ten sam odcinek drogi (stanowisko WIM), składowa dynamiczna nacisku będzie miała powtarzalny kształt [10]. Zjawisko to jest zobrazowane na rysunku 5.



Rys. 5. Ilustracja zjawiska przestrzennej powtarzalności nacisku osi

Z rysunku 5 wynika, że gdyby pomiar nacisku odbywał się punkcie x_i wzdłuż drogi, to średni wynik ważenia byłby zawyżony o wartość ρ względem składowej stałej nacisku P_0 . Przestrzenna powtarzalność nacisku osi jest przyczyną występowania błędów obciążenia w wynikach ważenia (patrz zależność (3)).

$$p(t) = P_0 + P(t) + \rho \quad (3)$$

Występujące zróżnicowanie nacisków w kolejnych przejazdach wynika z dodatkowych czynników wpływających na dynamikę pojazdu takich jak prędkość, rodzaj zawieszenia, ścieżka przejazdu, wiatr czy też reakcje kierowcy.

Wpływ zmiany prędkości pojazdu na stanowisku ważącym

W przypadku rodziny piezoelektrycznych czujników nacisku, wynik estymacji nacisku statycznego na podstawie zarejestrowanych sygnałów zależy wprost proporcjonalnie od prędkości pojazdu. Jeżeli chodzi o czujniki polimerowe, [17] zależność ta opisana jest wzorem (4):

$$N = k_1 \cdot V \cdot \tau \cdot \int_0^{\tau} n(t) \cdot dt \quad (4)$$

a dla czujników kwarcowych [14] wzorem (5):

$$N = k_2 \cdot V \cdot \int_0^{\tau} n(t) \cdot dt \quad (5)$$

w których:

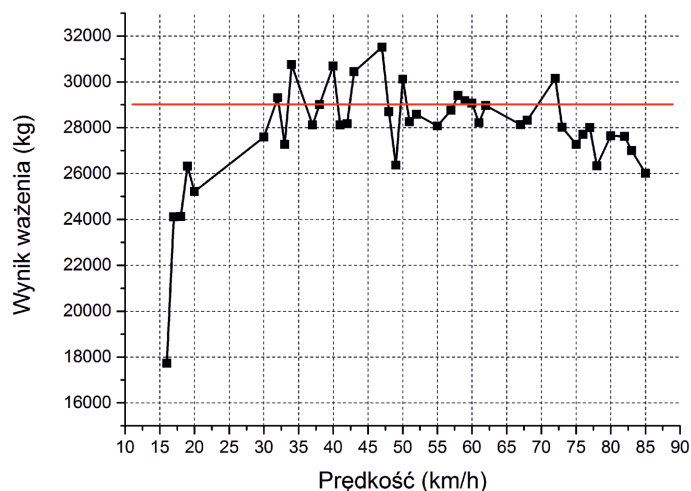
- N – nacisk osi na czujnik,
- k_1, k_2 – współczynniki kalibracji,
- V – prędkość pojazdu,
- τ – czas trwania sygnału,
- $n(t)$ – sygnał z czujnika nacisku, wygenerowany pod wpływem nacisku poruszającej się osi.

Błędny pomiar prędkości pojazdu lub zmiana prędkości podczas pomiaru, wprost proporcjonalnie przenosi się na

wynik obliczeń nacisku osi na czujnik, a w konsekwencji na końcowy wynik estymacji nacisku statycznego ze wszystkich czujników.

Ponadto zmiana prędkości podczas ważenia jest przyczyną dodatkowego pionowego wahanía pojazdu oraz tak zwanego „transferu masy” z jednej osi na drugą. Zjawisko to powoduje, że jedna oś pojazdu może być odciążona, a druga dociążona ponadnormatywnie. Prowadzi to do błędnych wyników ważenia i sytuacji, w której karani są kierowcy pojazdów, które faktycznie są obciążone normatywnie. Z drugiej strony kierowcy pojazdów przeciążonych mogą w ten sposób zaburzać pomiar, aby uniknąć kary. Stąd na stanowisku ważącym powinno obowiązywać ograniczenie prędkości, a pojazd powinien poruszać się ruchem jednostajnym.

Poprawny pomiar prędkości i jej monitorowanie ma dodatkowe znaczenie w przypadku często stosowanych czujników polimerowych, które pracują poprawnie w zakresie prędkości od 20 km/h do 120 km/h. Przykład zależności wyników ważenia od prędkości pojazdu, który wielokrotnie przejeżdżał przez stanowisko WIM zobrazowano na rysunku 6. Dane uzyskano na stanowisku WIM wyposażonym w polimerowe czujniki nacisku w Woli Dębińskiej.



Rys. 6. Wyniki ważenia pojazdu w systemie WIM wyposażonym w czujniki polimerowe (kolor czarny) oraz prawdziwa wartość wagi pojazdu (kolor czerwony)

Wyniki uzyskane poniżej i powyżej prędkości progowej należy uznać za niewiarygodne, a system powinien mieć zdolność detekcji takich zdarzeń.

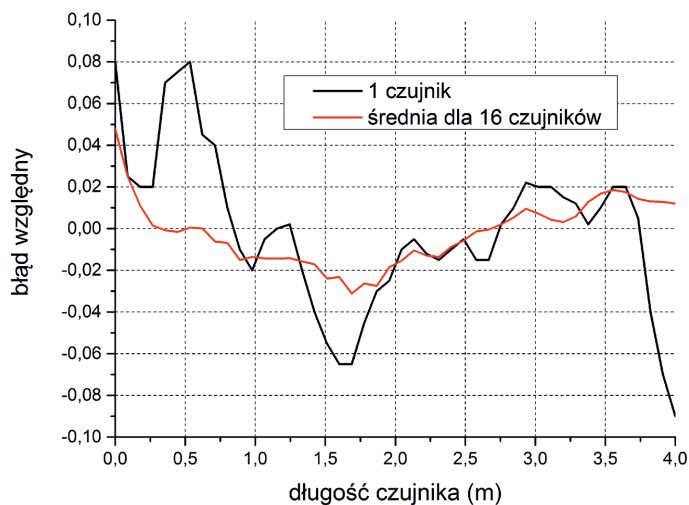
Rodzaj i klasa zastosowanych czujników nacisku

Czujniki nacisku ze względu na funkcję, którą pełnią, są niewątpliwie ważnym elementem każdego systemu WIM. Szeroko rozumiana „jakość” pozyskania informacji pomiarowej, w dużej mierze determinuje dokładność końcowej oceny nacisków osi, a w konsekwencji masy całkowitej ważonego pojazdu. Pośród szerokiej gamy, powszechne zastosowanie znalazły dwie grupy czujników nacisku: polimerowe i kwarcowe [2], [17], [18]. Choć ich zasada działania jest podobna,

to ze względu na różnice w technologii i sposobie wykonania ich właściwości metrologiczne różnią się diametralnie. Rozpatrując cechy tych czujników, pod uwagę należy wziąć dwie charakterystyki: niejednorodność czułości wzdłuż długości oraz podatność na zmiany temperatury nawierzchni.

Klasy czujników

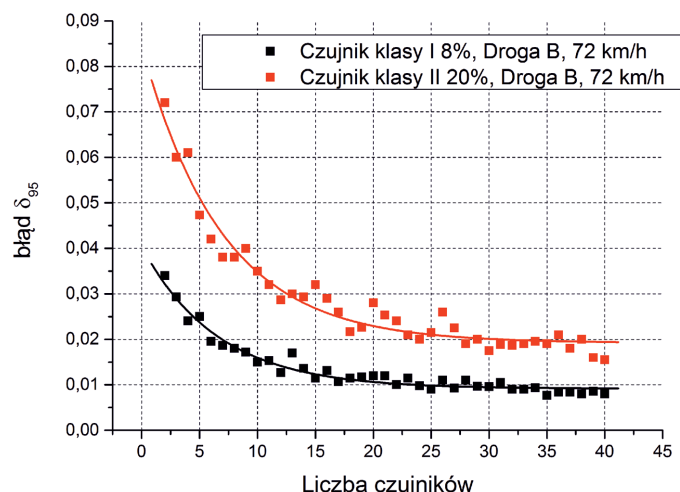
Czujniki polimerowe są produkowane w dwóch klasach [17]. Dla klasy I niejednorodność czułości wzdłuż długości czujnika zawiera się w granicach $\pm 8\%$ (dla najnowszych $\pm 5\%$), a dla klasy II w zakresie $\pm 20\%$. Czujniki kwarcowe mają znacznie lepsze właściwości pod tym względem i najnowsze rozwiązania Lineas firmy Kistler [18] charakteryzuje zmienność czułości nieprzekraczająca $\pm 2\%$. Teoretycznie oznacza to, że w najgorszym przypadku przy zastosowaniu jednego czujnika w systemie, niepewność ważenia spowodowana tylko tym czynnikiem może zawierać się w ww. granicach. Na rysunku 7 przedstawiono charakterystykę ilustrującą zmienność czułości czujnika polimerowego w funkcji jego długości. Ponieważ charakterystyki zmienności czułości nie są powtarzalne w przypadku kolejnych czujników, stąd przy zastosowaniu wielu czujników w systemie, dla danej ścieżki ruchu pojazdu, różnice w czułościach będą się uśredniały, minimalizując w efekcie błąd całego stanowiska związany z czujnikami. Uśrednioną charakterystykę wyników z 16 czujników w systemie reprezentuje czerwona krzywa na rysunku 7.



Rys. 7. Zmienność czułości czujnika polimerowego wyrażona jako błąd względny ważenia

Uśrednienie czułości wyników z 16 czujników w systemie przyniosło niemal czterokrotne zmniejszenie niejednorodności czułości. Wpływ tej cechy czujników na wyniki ważenia zbadano również symulacyjnie. W tym celu na podstawie danych producenta czujników wyznaczono model rozkładu błędów, wnoszony przez ich niejednorodną czułość. Założono, że wszystkie czujniki w systemie są tej samej klasy, a rozkład ich błędów ma charakter normalny o jednakowych parametrach (μ – wartość oczekiwana, σ – odchylenie standardowe). Aby jednoznacznie określić udział błędu wnoszonego przez same czujniki przyjęto, że nie występują pionowe wa-

hania pojazdu, a nacisk osi na dany czujnik jest równy naciskowi statycznemu.

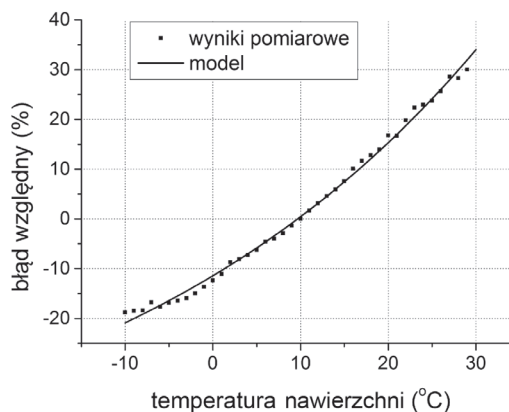


Rys. 8. Zależność błędu $\delta_{95\%}$ od liczby czujników systemu WIM na drodze o kategorii B, dla pojazdu poruszającego się z prędkością 72 km/h i dwóch klas czujników polimerowych

Wnioski, które można wyciągnąć na podstawie analizy charakterystyk z rysunku 8, są tożsame z wnioskami płynącymi z analizy rysunku 7. Zwiększenie liczby czujników z 2 do 16, powoduje niemal czterokrotne zmniejszenie błędu ważenia $\delta_{95\%}$ dla obydwu klas czujników. Jednocześnie dalsze zwiększanie liczby czujników nie przynosi już wymiernych korzyści, a jedynie zwiększa koszty budowy systemu MS-WIM.

Wpływ temperatury nawierzchni

Czujniki nacisku montowane są w nawierzchni jezdni, która w ten sposób staje się elementem układu pomiarowego. Dokładność wyników ważenia będzie więc zależeć nie tylko od kategorii nawierzchni na stanowisku, ale również od właściwości fizyko-mechanicznych masy bitumicznej, w której wbudowane są czujniki. Asphalt jest materiałem, którego właściwości są funkcją temperatury i czasu obciążenia. Wraz ze



Rys. 9. Charakterystyka temperaturowa systemu WIM w Gardawicach – zależność błędu ważenia od tempory nawierzchni

zmianą tych wielkości zmienia się przede wszystkim jego konsystencja charakteryzowana przez lepkość i sprężystość [7]. Zjawisko to szczególnie silnie oddziałuje na piezoelektryczne czujniki polimerowe, zatopione w nawierzchni, która przenosi sygnał nacisku na czujnik. Zjawisko to zobrazowano na rysunku 9.

Charakterystyka na rysunku 9 została wyznaczona eksperymentalnie i dotyczy stanowiska *WIM* w Gardawicach na podstawie długoterminowych rejestracji wyników ważenia pierwszej osi pojazdów odniesienia [5], [8]. Kalibrację systemu wykonano przy temperaturze 10 °C, stąd temperaturze tej odpowiada zerowa wartość błędów. Do tak otrzymanych danych dopasowano model (6).

$$C_T(T_a) = k_T \cdot 10^{w_T \cdot T_a} + b_T \quad (6)$$

w którym:

T_a – temperatura nawierzchni [°C],

$k_T=0,4659$ – współczynnik wzmocnienia,

$w_T=0,0098$ – współczynnik nachylenia krzywej,

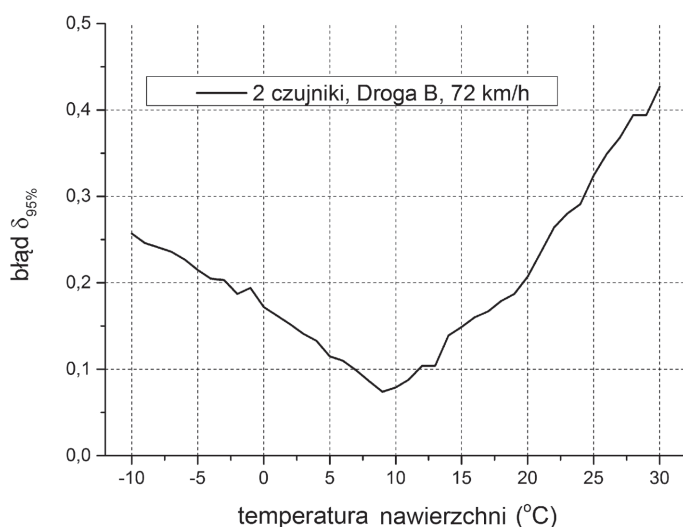
$b_T=0,4199$ – stała.

Model (6) to znana w literaturze [11] zależność określająca wpływ temperatury nawierzchni asfaltowej na jej sztywność, a pośrednio na wynik ważenia. Model ten jest podstawą opracowanej przez autora metody korekcji temperatury wyników ważenia, która umożliwia kompensację wpływu temperatury na dokładność uzyskiwanych wyników [5].

Z przedstawionej charakterystyki nasuwa się istotny wniosek, godny podkreślenia:

w przypadku systemów z czujnikami polimerowymi, nawet nieznaczna zmiana temperatury nawierzchni względem wartości, w której kalibrowany był system, powoduje bardzo duże błędy wyników ważenia.

Przykładowo, zmiana temperatury nawierzchni o 10 °C powoduje niemal 15% zmianę wyników ważenia. Oznacza to, że nawet dobowe wahania temperatury mogą spowodować, iż system ważący będzie znacznie zaniżał lub zawyżał wyniki ważenia (nawet o kilkanaście procent). Wpływ tego zjawiska na dokładność ważenia w systemie dwuczujnikowym zbada-



Rys. 10. Zależność błędów $\delta_{95\%}$ od temperatury nawierzchni na drodze o kategorii B, dla pojazdu poruszającego się z prędkością 72 km/h

no również symulacyjnie, wykorzystując model (6). Oprócz temperatury, jako czynnik zakłócający wzięto pod uwagę pionowe wahania pojazdu. Charakterystyka z rysunku 10 opisuje łączne oddziaływanie obecności składowej dynamicznej i zmian temperatury na dokładność ważenia.

Zgodnie z oczekiwaniami minimum błędów $\delta_{95\%}$ występuje dla temperatury 10 °C. Istotny wniosek jest taki, że bez korekcji temperatury wyników ważenia, zmiana temperatury nawierzchni, obok pionowych wahań pojazdu, jest drugim pod względem ilościowym czynnikiem zwiększającym błędy ważenia. Stąd w systemie ważącym konieczna jest implementacja korekcji temperatury bądź autokalibracji systemu [5]. Wady tej pozbawione są systemy wyposażone w czujniki kwarcowe, które ze względu na konstrukcję mają bezpośredni kontakt z oponami ważonego pojazdu.

Podsumowanie

Ze względu na specyficzną konstrukcję systemów *WIM*, w której nawierzchnia jezdni jest częścią systemu pomiarowego, właściwości metrologiczne wag dynamicznych są trudne do opisanego. Dodatkowo w procesie wykonywania pomiaru występuje szereg czynników zakłócających, których udział w łącznym błędzie ważenia jest trudny do zbadania w sposób eksperymentalny. Czynniki te zostały sklasyfikowane ze względu na miejsce ich występowania i ich znaczenie. Dzięki badaniom symulacyjnym oceniono w sposób ilościowy indywidualny wpływ każdego z czynników z osobna. Podsumowując należy stwierdzić, że:

- największy niekorzystny wpływ na dokładność wyników ważenia mają pionowe wahania pojazdu oraz w przypadku systemów z czujnikami polimerowymi dodatkowo zmiany temperatury nawierzchni,
- amplituda składowej dynamicznej nacisku osi zależy głównie od kategorii nawierzchni jezdni oraz prędkości pojazdu,
- minimalizację wpływu pionowych wahań pojazdu na dokładność ważenia można osiągnąć poprzez odpowiednią lokalizację stanowiska *WIM*, ograniczenie prędkości poniżej 60 km/h oraz zastosowanie większej liczby czujników niż 2 (optymalnie 16),
- w taki sam sposób można osiągnąć minimalizację wpływu niejednorodności czułości czujników w funkcji ich długości; ponadto należy stosować czujniki o najlepszych parametrach, najlepiej czujniki kwarcowe,
- w przypadku zastosowania czujników polimerowych, system musi być wyposażony w algorytmy kompensacji wpływu zmian temperatury na wynik ważenia, np. korekcję temperatury lub autokalibrację (czujniki kwarcowe praktycznie nie są podatne na zmiany temperatury nawierzchni).

Aby osiągnąć największą dokładność ważenia, system *WIM* powinien być zainstalowany na jezdni o najlepszej kategorii A (najlepsza równość i nośność), czujniki nacisku powinny się charakteryzować odpornością na wpływ temperatury nawierzchni i najmniejszą niejednorodnością czułości wzdłuż długości (czujniki kwarcowe), liczba czujników powinna zawierać się pomiędzy 8 a 16, na stanowisku powinno obowią-

zywać ograniczenie prędkości. W praktyce spełnienie wszystkich tych wymagań (i dodatkowych, o których nie było tu mowy) jest trudne, o ile nie niemożliwe. Stąd obecnie stosowane popularne systemy dwuczujnikowe pracują wyłącznie jako systemy preselekcyjne do wstępnej selekcji pojazdów, które następnie są kierowane do kontroli na wagach statycznych. Próby zastosowania systemów WIM w celach administracyjnych zostały podjęte w Czechach (po odpowiednim dostosowaniu prawa), jednak wycofano się z tego pomysłu. Z dużą rezerwą należy podchodzić do deklarowanych przez producentów wag dynamicznych wartości błędów ważenia na poziomie pojedynczych procentów. Doświadczenie autora z badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych na rzeczywistym systemie WIM wyposażonym w czujniki polimerowe wskazuje, że w przypadku zastosowania tylko dwóch czujników nacisku dokładność wyznaczenia nacisków osi jest rzędu kilkunastu procent, a masy całkowitej na poziomie 10% (i to pod warunkiem zastosowania algorytmów kompensujących wpływ temperatury nawierzchni na wynik).

Bibliografia

- [1] P. Burnos, *Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu. Część 2: Rodzaje i charakterystyka systemów Weigh In Motion*, Drogownictwo, nr 7-8, 2014
- [2] P. Burnos, *Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu. Część 3: Czujniki nacisku stosowane w systemach Weigh In Motion (WIM)*, Drogownictwo, nr 9, 2014
- [3] P. Burnos, J. Gajda, P. Piwowar, R. Sroka, M. Stencel, T. Żegleń, *Accurate Weighing of Moving Vehicles*. Metrology and Measurement Systems, Vol. XIV, No. 4/2007, str. 508–516
- [4] P. Burnos, J. Gajda, P. Piwowar, R. Sroka, M. Stencel, T. Żegleń, *Measurements of Road Traffic Parameters Using Inductive Loops and Piezoelectric Sensors*, Metrology and Measurement Systems, vol. XIV, No. 2, 2007, str. 187-203
- [5] P. Burnos, *Auto-Calibration and Temperature Correction of WIM Systems*, Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, 5th International Conference on Weigh-in-Motion of Heavy Vehicles. Paryż, Wiley, 2008, str. 300 -307
- [6] D. Cebon, *Handbook of Vehicle-Road Interaction*. Swets&Zeitlinger B.V., Lisse, (Netherlands), 1999
- [7] I. Gawel, M. Kalabińska, J. Piłat, *Asfalty drogowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2001
- [8] J. Gajda, R. Sroka, T. Żegleń, P. Burnos, *The influence of temperature on errors of WIM systems employing piezoelectric sensors*, Metrology and Measurement Systems, 2013 vol. 20 no. 2, str. 171–182
- [9] M. Huhtala, *Factors Affecting Calibration Effectiveness*, Proceedings of the Final Symposium of the Project WAVE, Paris 1999, str. 297–306
- [10] B. Jacob, V. Dolcemascolo, *Spatial Repeatability of Dynamic Loading On a Pavement, Pre-Proceedings, COST323 – Weigh in Motion of Road Vehicles, 2nd European Conference, Lisbona 1998*, str. 291 - 302
- [11] E. Lukanen, R. Stubstad, R. Briggs, *Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement*, Final Report of LTPP, Federal Highway Administration 06/2000
- [12] R. Sroka, *Metody fuzji danych w pomiarach parametrów ruchu drogowego*, Seria Rozprawy-Monografie nr 182, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowe - Dydaktyczne, Kraków 2008
- [13] „COST 323.” Weigh-in-Motion of Road Vehicles, 1999.
- [14] Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data, ISO 8608, First edition 1995-09-01
- [15] <http://www.kalibra.nl>
- [16] <http://www.mssoftware.com/>
- [17] <http://www.meas-spec.com/>
- [18] <http://www.kistler.com/>

Z SERWISU GDDKiA

Droga ekspresowa S17 Kurów-Lublin-Piaski oddana do ruchu

Tylko 35 minut zajmuje przejazd blisko 70-kilometrowego odcinka drogi ekspresowej S17 od węzła Kurów Zachód do węzła Piaski Wschód. Dziś oddano do użytku północną część obwodnicy Lublina, ostatnie z pięciu zadań na jakie podzielono budowę całej trasy. Odcinek pomiędzy węzłami Lublin Sławinek i Lublin Rudnik połączył funkcjonujące już pozostałe fragmenty pozwalając skorzystać z całej trasy. Tym samym ruch tranzytowy może ominąć centrum Lublina.

Oddany do użytku blisko 10-kilometrowy odcinek drogi ekspresowej pomiędzy węzłami Lublin Sławinek i Lublin Rudnik będzie w przyszłości najbardziej obciążonym fragmentem obwodnicy. Stanowi bowiem wspólny przebieg trzech dróg ekspresowych: S12, 17 i 19 i z tego powodu zbudowano go w układzie docelowym z trzema pasami ruchu na każdej jezdni. Skrajne węzły: Lublin Sławinek i Lublin Rudnik są największymi na obwodnicy Lublina. Znajdujący się pomiędzy nimi węzeł Lublin Czechów początkowo będzie wyłączony z użytkowania. Po ukończeniu przez Zarząd Dróg Wojewódzkich budowy łącznika z węzła do DW809 będzie można zjechać z węzła na północ. W przyszłym roku Miasto Lublin wspólnie z ZDW ukoń-



czy budowę ul. Poligonowej co umożliwi jazdę z węzła na południe do Lublina.

Umowę na realizację odcinka pomiędzy węzłami Lublin Sławinek i Lublin Rudnik podpisano 6 grudnia 2011 roku. Wartość inwestycji wyniosła ok. 659,5 mln zł (przygotowanie projektu, odszkodowania za nieruchomości, budowa, nadzór). W ramach inwestycji zbudowano 9,6 km drogi ekspresowej, przebudowano wylot z Lublina na Lubartów w ciągu drogi nr 19 (3,2 km) oraz wykonano ponad 27 km dróg serwisowych dla obsługi ruchu lokalnego. Powstały dwa węzły drogowe oraz wiele obiektów inżynierskich

Budowa drogi ekspresowej S17 Kurów – Lublin – Piaski, największej tego rodzaju inwestycji na terenie województwa lubelskiego, współfinansowana jest przez Unię Europejską ze środków Funduszu Spójności w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko. Wartość całej inwestycji to ok. 3,3 mld zł, z czego dofinansowanie unijne to ok. 2,2 mld zł. Umowę na realizację pierwszego z pięciu odcinków podpisano 12 listopada 2010 roku.



Wybrał: Tadeusz Suwara