



DARIUSZ GODLEWSKI

Politechnika Warszawska
d.godlewski@il.pw.edu.pl



STANISŁAW SZPINEK

Polska Inżynieria
sp. z o.o.
s.szpinek@polskainzynieria.pl

Diagnostyka nawierzchni jezdni w miejscach zdarzeń drogowych

Zdarzenie drogowe określa sytuację szczególną dotyczącą ogólnie odcinka (albo miejsca) drogi, oceny warunków użytkowania i stanu bezpieczeństwa użytkowników. W powszechnym znaczeniu jest ono kojarzone zwykle z miejscem kolizji bądź wypadku drogowego. Z reguły ma charakter lokalny i analizuje się je kompleksowo w układzie Człowiek – Pojazd – Nawierzchnia. W analizie rzeczywistych warunków ruchu związanych z obciążeniem i przyczepnością kół pojazdu w miejscu

uznanym za niebezpieczne, np. typu „czarny punkt”, mogą być przydatne metody i procedury badawcze, jakie stosuje się w drogownictwie, gdzie ze względu na bezpieczeństwo użytkowania nawierzchni jezdni jako najważniejsze jej cechy eksploatacyjne wyróżnia się *równość* i *poślizgowość* (inaczej *szorstkość* albo *właściwości przeciwpoślizgowe*, niekiedy *przyczepność*), [1], [2], [3], [4], [7] i [8]. Podane cechy nawierzchni na potrzeby *oceny stanu technicznego* wyraża się umownie za pomocą ustalonych parametrów diagnostycznych. W ocenie równości powszechnie uznaną na świecie miarą (wielkością) kinematycznego oddziaływania profilu podłużnego na jadący model pojazdu samochodowego jest wskaźnik *IRI (International Roughness Index)*, [6], [10], [11], [12], [14] i [20]. Natomiast przy ocenie poślizgowości aktualnie użyteczną miarą może być współczynnik tarcia określony przy niepełnym poślizgu koła, adekwatnym do pracy układu wspomagającego hamowanie pojazdu (ABS), np. [9] i [22]. W przypadku obu parametrów dane wyjściowe (elementarne) do ich wyznaczenia są mierzone bezpośrednio przez najnowszej generacji specjalistyczne urządzenia, które z dużą gęstością w sposób ciągły próbują powierzchnię nawierzchni jezdni (*krok próbkowania*), a wyniki zapisują w zbiorze pomiarowym z deklarowaną rozdzielczością (*krok pomiarowy*). Aktualnie na sieci dróg krajowych jest wdrażany przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad system Diagnostyki Stanu Nawierzchni (DSN) [4], który w odniesieniu do szeregu wybranych parametrów technicznych zajmuje się kompleksowo zbieraniem, przetwarzaniem i archiwizacją danych elementarnych, jakie w tym celu są umieszczane w zbiorach o ustalonej strukturze i mogą być wykorzystane zarówno dla potrzeb administracji drogowej, jak i jednostek specjalizujących się w audycie bezpieczeństwa ruchu drogowego. Uzyskane w układzie współrzędnej drogi wielkości pomiarowe są standardowo przetwarzane (agregowane) dla określonych odcinków badanej na-

wierzchni jezdni o długości 50 m, 100 m albo 1000 m na *systemowe oceny stanu zużycia*, które odniesione do odpowiednio ustalonych skal klasyfikacyjnych charakteryzują w skrócie jej *stan techniczny*, jako *dobry*, *zadowalający*, *niezadowalający* (wymagany remont) albo *zły* (niezwłoczna naprawa), [13], [16] i [19]. W wyniku agregacji zarejestrowanych z małym krokiem pomiarowym zbiorów danych elementarnych o stanie nawierzchni jezdni są niekiedy traczone pewne szczegółowe zapisy miejsc osobliwych (anomali), które można z powodzeniem wykorzystać w analizie przyczyn zdarzeń drogowych, np. [15], [17] i [18].

W artykule omówiono wybrane metody badań równości i szorstkości nawierzchni jezdni, w tym urządzenia i procedury pomiarowe, jakie mogą mieć zastosowanie w *diagnostyce miejsc zdarzeń drogowych*, oraz przedstawiono różne przykłady niestandardowych sposobów przetwarzania i opracowania danych pomiarowych pochodzących zarówno z miejsc o oczekiwanych skokowo zmiennych cechach nawierzchni jezdni, np. na połączeniu technologicznym, dylatacji, na granicy lokalnych napraw, na obrzeżu oznakowania poziomego, jak i wizualnie nierozpoznawalnych nieciągłości, mających wpływ na warunki i bezpieczeństwo ruchu pojazdów.

Urządzenia do pomiaru profilu nierówności nawierzchni drogowej

Ocena komfortu jazdy pojazdów i wielkości obciążenia nawierzchni drogowych, zarówno w badaniach odbiorczych nawierzchni nowych, jak i w badaniach systemowych nawierzchni użytkowanych na sieci dróg, dokonywana jest z wykorzystaniem numerycznego zapisu podłużnego profilu nierówności, jaki w tym celu może być zarejestrowany przez mechaniczny albo laserowy *profilograf*, który spełnia określone przez Bank Światowy wymagania dla specjalistycznych urządzeń pomiarowych I klasy dokładności, *World Bank Technical Paper Number 46, ISBN 0-8213-0590-5*.

Profilograf laserowy typu RSP (Road Surface Profiler) produkcji firmy *Dynatest* z Dani jest najczęściej używanym w Polsce na sieci dróg krajowych wielofunkcyjnym urządzeniem pomiarowym, które ma możliwość mierzenia rzędnych profili nierówności nawierzchni w sposób ciągły, zazwyczaj wielotorowo na pasie ruchu o szerokości ok. 2,8 m ÷ 3,3 m, przez odpowiednio rozmieszczone czujniki laserowe wewnątrz belki z przodu pojazdu pomiarowego, fot 1.

W trakcie pomiaru każdy z czujników laserowych próbkuje profil nawierzchni jezdni z krokiem o długości około 5 mm, a uśrednione rzędne tych profili w przypadku odcinków



Fot. 1. Profilograf RSP (Road Surface Profiler) produkcji firmy Dynatest

drogi o zadeklarowanej stałej długości kroku pomiarowego ($5 \div 25$ cm) są na bieżąco zapisywane w zbiorze pomiarowym RSP. Pomiary najczęściej wykonuje się przy prędkości jazdy profilografu równej 50 km/h, ale stosownie do panujących warunków ruchu i bez istotnego wpływu na wyniki pomiaru można ją zmieniać w szerokim zakresie od 20 km/h do 110 km/h. Oprócz laserowych czujników, profilograf RSP jest wyposażony w żyroskop, akcelerometry, GPS i centralny komputer, który podczas pomiaru może jednocześnie rejestrować w postaci numerycznej zarówno profile podłużne i poprzeczne nawierzchni jezdni, jak również inne charakteryzujące ją parametry geometryczne, np.: spadki podłużne i poprzeczne, krzywizny łuków poziomych i pionowych, zmiany azymutu toru jazdy, współrzędne geograficzne oraz odpowiednio zdefiniowane oceny stanu technicznego. Profilograf RSP wyposażony jest także w dystansomierz, który wykorzystywany jest do pomiaru odległości pomiędzy wybranymi przez operatora zdarzeniami o określonych współrzędnych drogi. Dane są na bieżąco zapisywane w zbiorze pomiarowym i służą później, podczas przetwarzania wyników pomiaru, do zlokalizowania w układzie współrzędnej drogi zarejestrowanych parametrów technicznych nawierzchni jezdni. W badaniach odbiorczych i w systemowej ocenie równości podłużnej nawierzchni drogowych wykorzystuje się na ogół jeden wybrany zapis profilu nierówności z trzech torów, jakie są mierzone na pasie ruchu w osi i w obu śladach kół pojazdu pomiarowego.

Urządzenia do pomiaru współczynnika tarcia nawierzchni drogowej

Na potrzeby badań odbiorczych i systemowych nawierzchni drogowych pod względem właściwości przeciwpoślizgowych wykonuje się w Polsce pomiary współczynnika tarcia przy pełnej blokadzie koła testowego w miejscach (punktach) o długości ok. 10 m oddalonych od siebie co 50 m albo 100 m za pomocą doczepnego urządzenia typu SRT-3 produkcji IBDiM w osi pojazdu holującego. W celu zwiększenia szczegółowości rozpoznania stanu nawierzchni na sieci dróg publicznych, aktualnie są prowadzone prace wdrożeniowe

innego rodzaju urządzeń, które tego typu pomiary wykonują na całym odcinku ocenianej nawierzchni jezdni w sposób ciągły przy niepełnym poślizgu koła testowego.

Urządzenie typu TWO (Traction Watcher One) jest doczepnym urządzeniem pomiarowym produkcji firmy Olsense z Norwegii, które służy do pomiaru poślizgowości nawierzchni drogowych i lotniskowych. Zestaw pomiarowy składa się ze specjalnie wyposażonego samochodu holującego i dwukółkowej przyczepki, fot. 2.



Fot. 2. Urządzenie TWO (Traction Watcher One) produkcji firmy Olsense. Widok ogólny przyczepki do pomiaru współczynnika poślizgowości (tarcia) nawierzchni drogowych i lotniskowych

Przyczepka na czas wykonywania pomiaru jest montowana z tyłu pojazdu w lewym śladzie kół i może być ustawiona za pomocą siłownika hydraulicznego w jednej z dwóch pozycji: transportowej (z kołami uniesionymi nad nawierzchnią jezdni) albo pomiarowej (z kołami dociśniętymi do nawierzchni ze stałą siłą $F = 0,6$ kN). Do pomiaru poślizgowości nawierzchni używa się dwóch takich samych kół z oponą zabezpieczoną (gładką), zgodną z normą ASTM 155, które są sprzężone ze sobą przekładnią łańcuchową. Pierwsze z nich jest toczone swobodnie po nawierzchni z ustaloną, stałą prędkością jazdy pojazdu holującego (V) od 5 km/h do 100 km/h, a drugie obraca się z wymuszonym poślizgiem 17,8% (zakres z przedziału pracy układu ABS).

Istota pomiaru współczynnika tarcia polega na stałym mierzeniu siły oporu wolniej obracanego drugiego koła, bezpośrednio przed którym nawierzchnia w sposób kontrolowany jest zwilżana wodą ze zbiornika znajdującego się wewnątrz pojazdu holującego. Takie pomiary mogą być wykonywane również bez użycia wody, np. do bieżącej oceny warunków ruchu na nawierzchni śliskiej, oblodzonej (w zimie) itp. W zbiorze pomiarowym TWO dla odmierzanych przez pierwsze z kół odcinków nawierzchni o zadeklarowanej stałej długości kroku pomiarowego z przedziału od 0,5 m do ponad hektometra, standardowo 10 m (jak w pomiarach punktowych), są zapisywane w kolejnych rekordach następujące dane, tj. uśredniony wynik pomiaru współczynnika tarcia (mi), siła nacisku (F), prędkość pomiarowa (V), a także współrzędne GPS oraz przejechany dystans i umowne

znaczniki charakterystycznych punktów, jakie mogą być pomocne przy lokalizacji wyników pomiaru względem układu współrzędnej drogi.

Charakterystyka modelu pojazdu samochodowego jako układu dynamicznego

Równość podłużna jest cechą eksploatacyjną, która w odczuciu użytkownika pojazdu wyraża zdolność danej nawierzchni jezdni do niewzbudzenia wstrząsów i drgań. W Polsce w badaniach odbiorczych i systemowych przyjęto wskaźnik *IRI* za jednostkową miarę (ocenę) równości odcinka nawierzchni jezdni o długości nie większej niż 50 m.

Wskaźnik *IRI* (*International Roughness Index*) charakteryzuje pracę zawieszenia w umownie przyjętym dynamicznym modelu pojazdu samochodowego o dwóch stopniach swobody, który teoretycznie jedzie ze stałą prędkością 80 km/h po zarejestrowanym przez urządzenie pomiarowe profilu nierówności nawierzchni, rysunek 1.

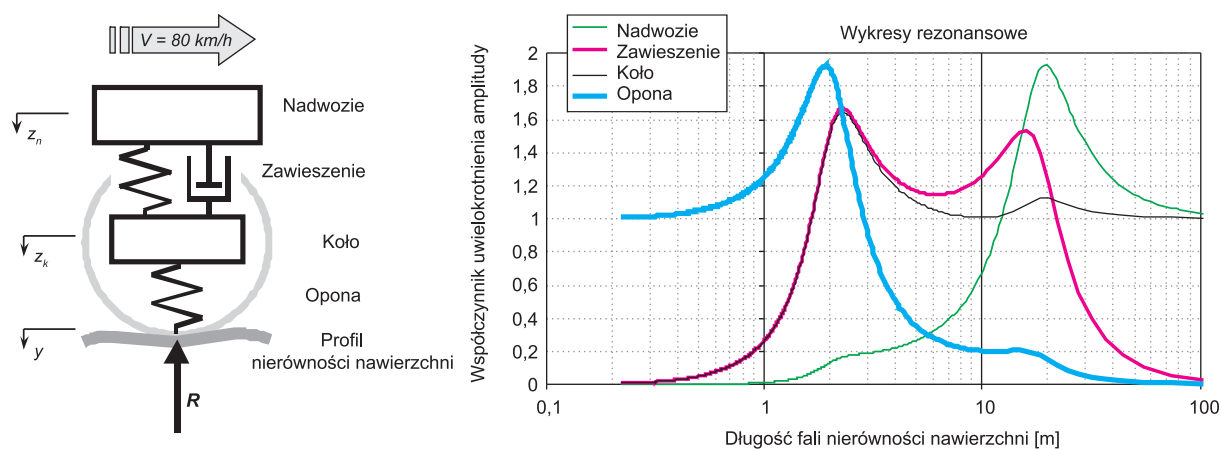
Jego wartość odpowiada *przeciętnemu odchyleniu*¹ wielkości przyrostu przemieszczenia względem siebie dwóch mas, nadwozia i koła, wywołanych kinematycznym wymuszeniem nierówności nawierzchni na przejechanym odcinku drogi w jednostce czasu i wyraża się go w mm/m (lub m/km). Jeśli dany profil nie wywoła w zamodelowanym zawieszeniu pojazdu żadnych efektów (*IRI* = 0 mm/m), to badany odcinek drogi uważa się za idealnie równy. Nawierzchnie w stanie dobrym (nowe) charakteryzują się mniejszymi wartościami *IRI* niż nawierzchnie zniszczone i zdeformowane. Zwykle wskaźnik *IRI* o większej wartości oznacza niższy oczekiwany komfort jazdy. Czyli im bardziej jest angażowany amortyzator wraz z resorem do tłumienia drgań i wstrząsów w jadącym po danej drodze pojeździe samochodowym, tym jej nawierzchnię uważa się za mniej równą.

¹ *Odchylenie przeciętne* – średnia arytmetyczna odchyżeń od przyjętej wartości odniesienia, jeżeli wszystkim odchyleniom jest przypisany znak dodatni (PN-ISO 3534-1:2002 *Statystyka. Terminologia i symbole*).

Pionowe drgania poszczególnych elementów składowych w obliczeniowym modelu pojazdu samochodowego, poruszającym się ze stałą prędkością po zadanym profilu drogi, zachowując przy tym ciągłość kontaktu opony z nawierzchnią, opisuje się układem dwóch równań różniczkowych zwyczajnych drugiego rzędu względem określonych układów statycznej równowagi. Poszukiwanym rozwiązaniem jest:

- ze względu na tok obliczeń wskaźnika *IRI* – wielkość przemieszczenia zawieszenia q (lub prędkość \dot{q}), które w danym punkcie drogi x równa się różnicy między wielkością drgań nadwozia i koła, tj. $q = z_n - z_k$, oraz
- ze względu na wielkość reakcji dynamicznie obciążonej nawierzchni (R) – wielkość ugięcia opony, które w danym punkcie drogi x równa się różnicy między wielkością drgań koła i profilem nierówności nawierzchni, tj. $u = z_k - y$.

W celu identyfikacji obliczeniowego modelu pojazdu zostały wykonane badania wrażliwości jego elementów w ruchu ustalonym na wymuszenie kinematyczne drogi, a wywołane symulowaną jazdą po zadanej sinusoidalnej fali nierówności nawierzchni o stałych parametrach: amplituda i długość. *Współczynnik uwielokrotnienia amplitudy* α równa się wielkości stosunku amplitudy drgań wymuszonych danego elementu do amplitudy fali wymuszającej. Na wykresie (rysunek 1) pokazano krzywe rezonansowe opisujące zależności trzech współczynników: α_n w przypadku nadwozia, α_z w przypadku zawieszenia i α_k w przypadku koła, od długości fali nierówności z przedziału od 0,3 m do 100 m. Sinusoidea o długości około 2,3 m wywołuje rezonans koła, natomiast o długości 19,5 m – rezonans nadwozia. W przypadku, gdy współczynnik α_z równa się zero, to zawieszenie będzie pozostawać w spoczynku, $q = 0$. Jeśli przyjąć, że efektywny zakres jego pracy liczy się dla $\alpha_z > 0,15$, to obejmuje on fale nierówności nawierzchni o długościach z przedziału od około 0,8 m do 48 m. Natomiast w przedziale pomiędzy 1,6 m a 22 m, gdzie $\alpha_z > 1$, amplituda drgań zawieszenia jest większa od amplitudy fali wymuszającej. Dwie ekstremalne (rezonansowe) wartości: $\alpha_{zk} = 1,67$ i $\alpha_{zn} = 1,54$, odpowiadają sinusoidom o długościach: 2,3 m i 15,9 m. Z tego wynika, zgodnie z założeniem, że wskaźnik



Rys. 1. Schemat modelu pojazdu samochodowego, jaki stosuje się w obliczeniach wskaźnika *IRI*, oraz charakterystyka dynamiczna pracy jego elementów

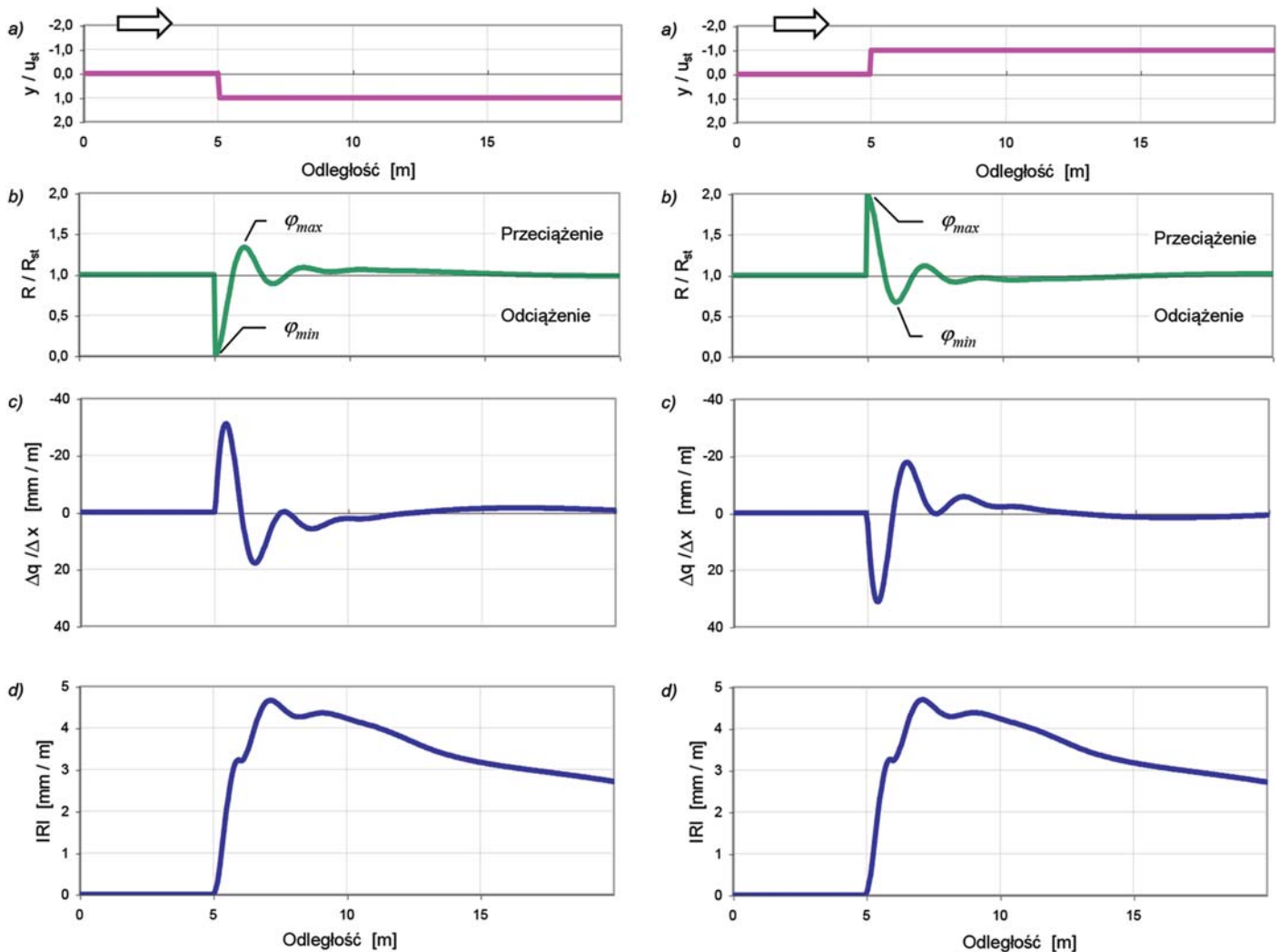
IRI łączy w sobie niejako dwie oceny o różnej czułości, jako wielkości charakteryzujące w jadącym pojeździe samochodowym drgania koła i nadwozia.

Natomiast zadaniem siły R , jaką dodatkowo wyróżniono na potrzeby badań diagnostycznych, jest równoważenie poruszającego się po nierównościach nawierzchni jezdni dynamicznego modelu samochodu. Na wykresie rezonansowym (rysunek 1) została pokazana, na tle trzech innych, zależność współczynnika uwielokrotnienia amplitudy odkształcenia opony od długości sinusoidalnej fali nierówności nawierzchni z przedziału od 0,2 m do 100 m. Największą wartość 1,92 uzyskano w przypadku sinusoidy o długości około 1,9 m, natomiast stosunkowo małe sprężyste odkształcenia opony wywołują sinusoidy o długościach powyżej 25 m. Z tego wykresu wynika, że zakres rezonansowy drgań opony w pełni zawiera się w przedziale długości fal nierówności nawierzchni jezdni, jakie są rejestrowane na sieci dróg publicznych przez specjalistyczne urządzenia pomiarowe.

Bezwymiarowy współczynnik dynamiczności obciążenia, nazywany w skrócie: współczynnik dynamiczny lub współ-

czynnik φ (f)), wyraża ile razy w danym punkcie drogi x siła R od jadącego po nierównościach nawierzchni jezdni modelu pojazdu ($V > 0$) jest większa od obciążenia statycznego R_{st} ($V = 0$ i $\varphi = 1$). Największe praktyczne znaczenie w ocenie niejednorodności obciążenia określonego odcinka drogi mają dwie ekstremalne wartości współczynnika φ . Wartość największa $\varphi_{max} \geq 1$, gdy chodzi o ocenę nośności konstrukcji nawierzchni (przeciążenie, wymiarowanie itp.), i wartość najmniejsza $\varphi_{min} \leq 1$, gdy chodzi o ocenę ryzyka utraty przez oponę ciągłości kontaktu z nawierzchnią (bezpieczeństwo ruchu, długość drogi hamowania itp.). W tym modelu, stan odpowiadający oderwaniu się opony od nawierzchni będzie występował wtedy, gdy $\varphi_{min} < 0$ i $R < 0$.

Poniżej, na dwóch przykładach zostały pokazane przebiegi zmian wartości współczynnika φ i wskaźnika IRI w funkcji drogi, które przedstawiają zachowanie się dynamicznego modelu pojazdu samochodowego w czasie przejazdu przez pojedynczą nierówność nawierzchni jezdni w postaci uskoku (zjazd i najazd) o wysokości równej ugięciu statycznemu opony $u_{st} = 17,3$ mm, rysunek 2.



Rys. 2. Dwa przykłady ilustrujące zachowanie się modelu pojazdu samochodowego w czasie przejazdu przez nierówność nawierzchni jezdni typu uskok, zjazd (cztery wykresy po lewej stronie) i najazd (cztery wykresy po prawej stronie), gdzie: a) profil nierówności, b) współczynnik φ , c) jednostkowy przyrost przemieszczenia zawieszenia i d) wskaźnik IRI

Jak wynika z danych zamieszczonych na wykresach, to model pojazdu samochodowego dojeżdżając do uskoku na odcinku drogi o długości $S = 5$ m zachowuje statyczną równowagę, $IRI = 0$ i $\varphi = 1$. Ale już dalej, wskutek skokowej zmiany poziomu niwelety drogi, następuje wymuszone sprężyste odkształcenie opony i sprężysto-lepkie odkształcenie zawieszenia, na które nakładają się oddziaływania sił wywołanych przemieszczaniem się mas koła i nadwozia, których kolejne swobodne wychylenia wokół stanu statycznej równowagi dosyć szybko zanikają. Dwie ekstremalne wartości współczynnika φ wynoszą odpowiednio: w przypadku zjazdu z uskoku 0,0 i 1,33, a w przypadku najazdu na uskok 0,67 i 2,0. Natomiast w obu przypadkach, krzywa opisująca zmianę wartości wskaźnika IRI na długości drogi uśredniania S przebiega podobnie. Największą wartość 4,7 mm/m osiągnął on w przypadku $S = 7,2$ m i wraz ze zwiększeniem długości odcinka uśredniania jego wartość odpowiednio maleje uzyskując: 2,7 mm/m w przypadku $S = 20$ m i 1,2 mm/m w przypadku $S = 50$ m. Zazwyczaj pojedyncze oceny równości podłużnej nawierzchni oblicza się dla odcinków drogi o ustalonej długości. W przypadku badań odbiorczych i systemowych długość ocenianego odcinka drogi wynosi $S = 50$ m, natomiast w analizach szczegółowych stanu nawierzchni, jego długość można zmniejszyć do zadeklarowanej długości kroku pomiarowego, by zwiększyć rozpoznawalność wpływu poszczególnych nierówności na warunki i bezpieczeństwo ruchu pojazdów.

Równie ważnym zagadnieniem jest ocena sprawności układu zawieszenia (amortyzatora) w obliczeniowym modelu pojazdu pod względem zdolności przylegania opony do nawierzchni w zakresie rezonansowym. I w tym celu zostały przeprowadzone symulacyjne badania tego modelu według założeń metody EUSAMA (*EUropean Shock Absorbers Manufacturers Association* – Europejskie Stowarzyszenie Producentów Amortyzatorów), [5], jakie w rzeczywistości wykonuje się na stanowisku diagnostycznym podczas okresowego przeglądu stanu technicznego każdego samochodu przed dopuszczeniem do ruchu. Układ zawieszenia uważa się za bardzo dobry, według ustalonej klasyfikacji, gdy otrzymana z badań ocena współczynnika dynamicznego jest większa od 60 proc., a za zły, gdy jest ona mniejsza od 20 proc. W przypadku badanego modelu uzyskano wynik 33,5 proc., a to oznacza, że sprawność jego amortyzatora jest słaba. Czyli przyjęty do rozważań teoretycznych obliczeniowy model pojazdu samochodowego charakteryzuje grupę pojazdów rzeczywistych, w których sprawność układu zawieszenia jest oceniana na poziomie dolnej granicy wymagań technicznych.

Przykład analizy warunków ruchu na odcinku drogi ekspresowej

Przedmiotem szczegółowych badań równości i poślizgowości była nawierzchnia asfaltowa na sześciokilometrowym odcinku prawej jezdni obwodnicy Radzymina (droga krajowa S8), na której przeprowadzono w różnej lokalizacji remont kilkudziesięciu poprzecznych pęknięć odbitych. W każdym takim miejscu została wykonana naprawa dolnych warstw konstrukcyjnych, którą przykryto na całej szerokości jezdni



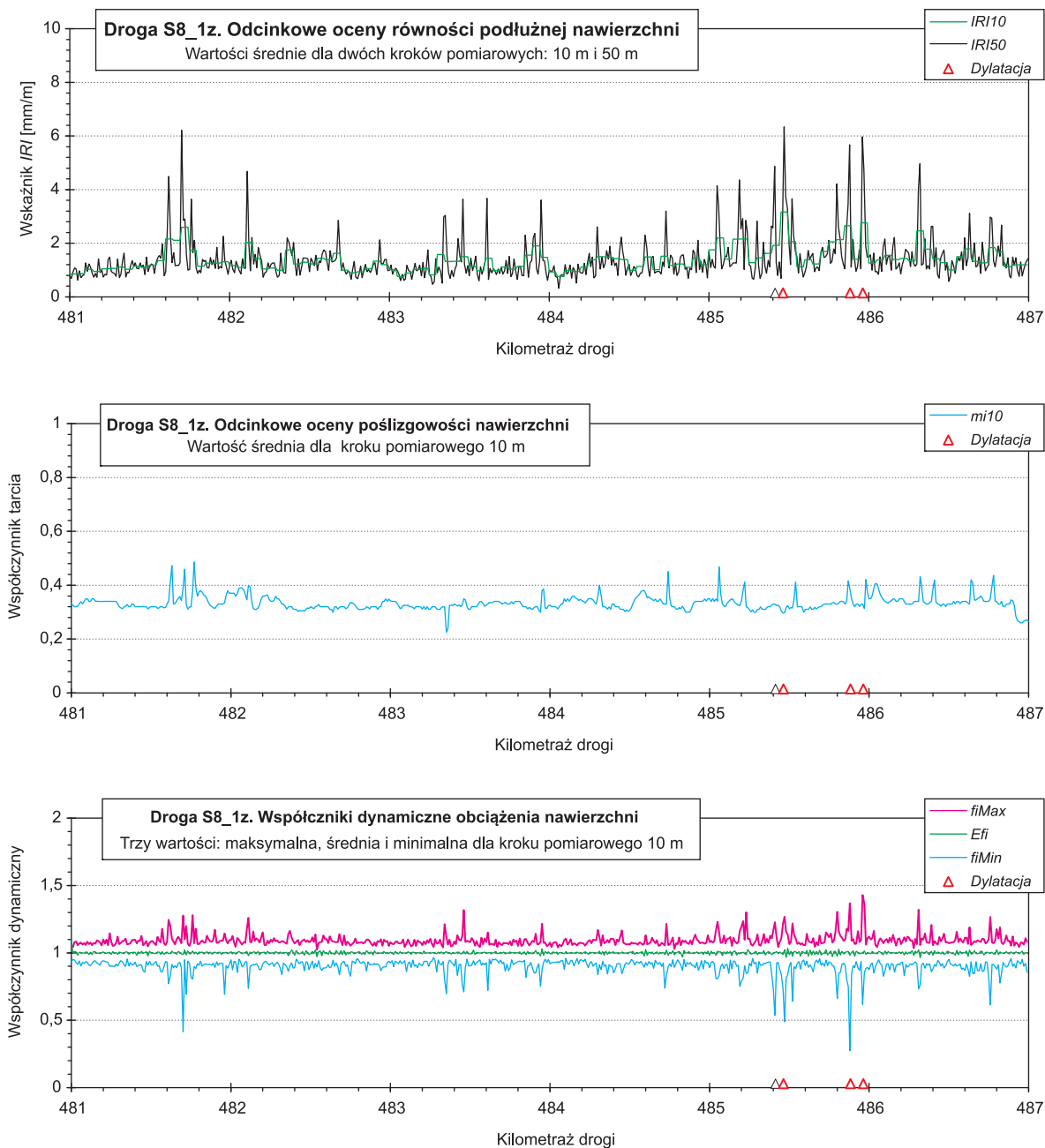
Fot. 3. Droga S8. Łata w miejscu naprawy pęknięcia poprzecznego nawierzchni jezdni

nakładką o długości około dziesięciu metrów, fot 3. Otrzymane z przeprowadzonych badań oceny jakościowe warunków użytkowania tej drogi pod względem równości i poślizgowości zestawiono na rysunku 3.

Generalnie stan badanej nawierzchni na wszystkich sześciu jednokilometrowych odcinkach drogi S8 pod względem równości podłużnej według klasyfikacji SOSN dla dróg krajowych klasy S jest dobry (klasa A, $IRI_{1000} < 2,0$ mm/m). Jak widać, to miejsca wielu lokalnych napraw (punktowych), podobnie jak dylatacje dwóch wiaduktów, wyróżniają się w stosunku do otoczenia dużo wyższymi wartościami jednostkowych ocen równości IRI_{50} i IRI_{10} oraz niektóre z nich także znacznie wyższymi współczynnikami tarcia mi_{10} . Z tego wynika, że chociaż łąty w większości zostały wykonane z betonu asfaltowego o aktualnie lepszych właściwościach przeciwpoślizgowych (okres gwarancyjny), to sposób jego wbudowania w wielu miejscach obniża komfort jazdy pojazdów, ponieważ przejazd po nich może wywoływać odczuwalne przez użytkowników wstrząsy samochodu. Natomiast z rozkładu ekstremalnych wartości współczynników dynamicznych, jakie wyznaczono dla dziesięciometrowych odcinków drogi wynika, że zmienia się on średnio w przedziale $1 \pm 0,03$, zaś około 5 proc. z nich wykracza poza przedział $1 \pm 0,10$ w miejscach lokalizacji niektórych łąt i dylatacji, które mogą wywoływać znacznie większe przeciążenia nawierzchni albo odciążenia kół pojazdów.

W szczegółowej analizie stanu nawierzchni posłużono się zestawem niestandardowych ocen warunków ruchu pojazdów, jakie wyznaczono dla dwóch wybranych odcinków hektometrowych, jednym z łątami (od km 481+690 do km 481+790) i drugim z wiaduktem drogowym (od km 485+400 do km 485+500), które pokazano na wykresach, rysunek 4.

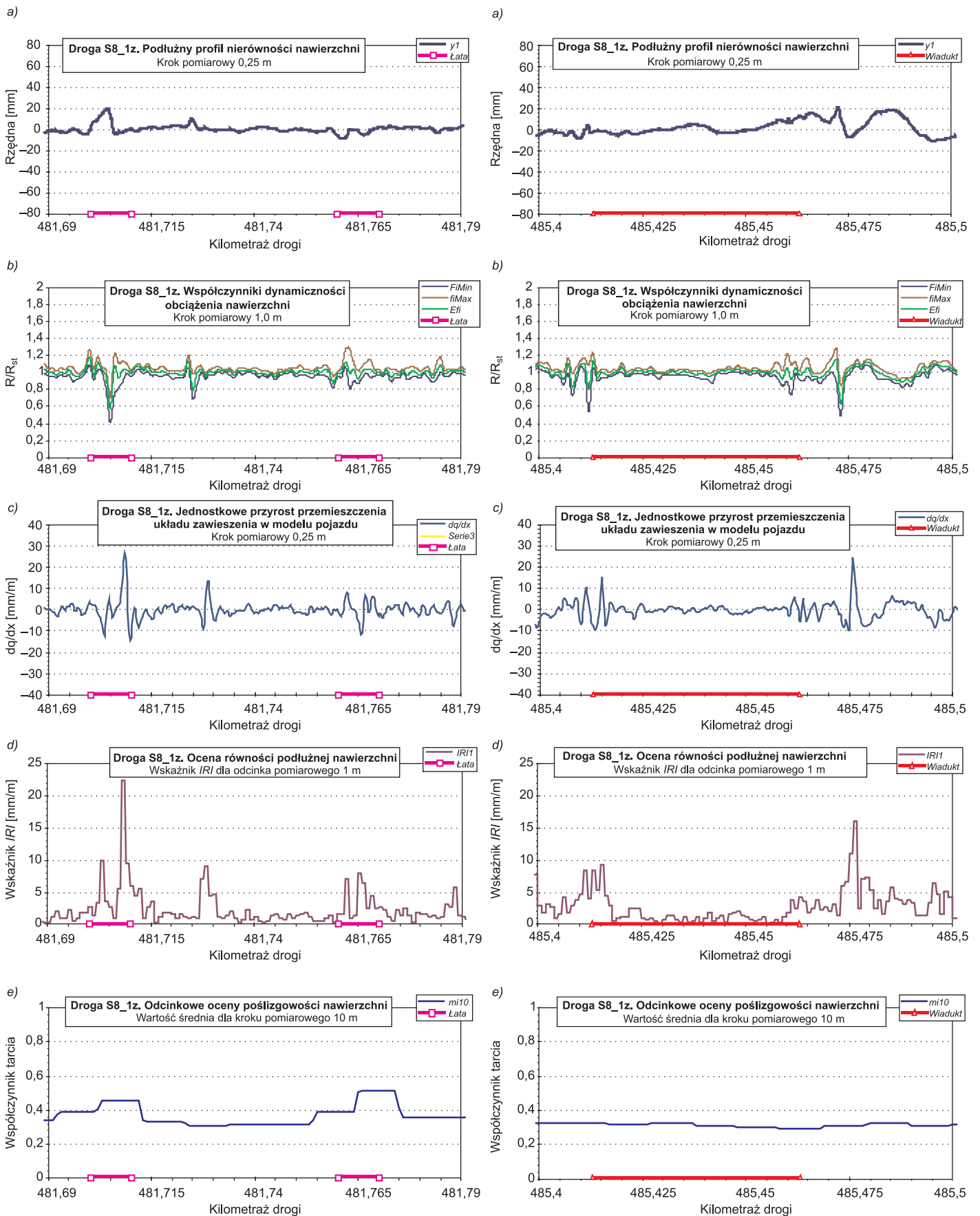
Z tych wykresów można odczytać, że miejsca dwóch połączeń technologicznych na obrzeżu napraw i dylatacje powodują zaburzenia płynności ruchu pojazdów. Ponadto z analizy współczynników dynamicznych wynika, że w ich pobliżu mogą znajdować się stosunkowo krótkie odcinki nawierzchni, gdzie stale podlega ona przeciążeniom



Rys. 3. Zestawienie odcinkowych ocen równości, poślizgowości i współczynnika dynamicznego remontowanej lokalnie (punktowo) nawierzchni na odcinku zewnętrznego pasa ruchu na prawej jezdni drogi krajowej S8 Warszawa – Wyszaków, od km 481+000 do km 487+000, gdzie łatę wykonano na całej szerokości jezdni o długości dziesięciu metrów w miejscach pęknięć odbitych (z przeniesienia)

($\varphi_{\min} > 1$), co sprzyja procesowi zużycia, a także takie, gdzie obciążenie dynamiczne koła jest stale mniejsze od obciążenia statycznego ($\varphi_{\max} < 1$), a to oznacza, że tam znajduje się ukształtowana na stałe strefa o potencjalnie zmniejszonej skuteczności hamowania pojazdu, np. jak na odcinku o długości 15 m, od km 485+480 do km 485+495, średnio o ok. 15%. Wartości jednostkowych przyrostów przemieszczeń układu zawieszania, jak i wyznaczone na ich podsta-

wie wskaźniki IRI dla odcinków o długości 1 m, są miarą poziomu nierówności nawierzchni i wskazują na dokładną lokalizację tych miejsc, których udział w odcinkowej ocenie równości jest największy (albo najmniejszy). Jak wynika z porównania ocen właściwości przeciwpoślizgowych, to niezależnie od zróżnicowania poziomu ocen równości otrzymano wyższe wartości współczynników tarcia w miejscach nowo wykonanych napraw nawierzchni.



Rys. 4. Przykład zastosowania niestandardowych metod oceny warunków użytkowania dla wybranych dwóch odcinków nawierzchni o długości 100 m z miejscami lokalnych napraw (pięć wykresów po lewej stronie) oraz z dylatacjami wiaduktu (pięć wykresów po prawej stronie), gdzie: a) profil nierówności nawierzchni, b) współczynniki dynamiczne, c) jednostkowy przyrost przemieszczenia zawieszenia w modelu pojazdu, d) wskaźniki IRI1 i e) odcinkowe oceny poślizgowości $mI10$.

Przykład analizy poślizgowości nawierzchni na odcinku ulicy

Przedmiotem badań poślizgowości była nawierzchnia asfaltowa na odcinku ulicy Skalnicowej w Warszawie, gdzie pomiary współczynnika tarcia wykonano urządzeniem TWO ze

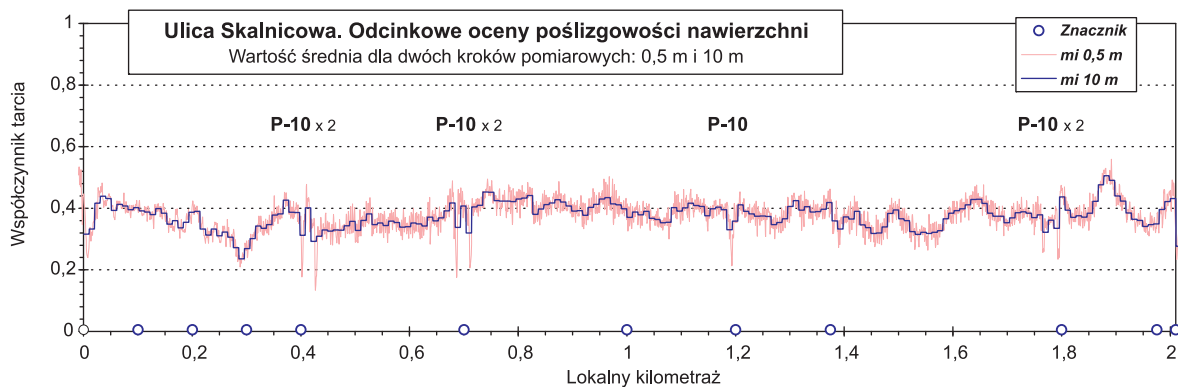


Rys. 5. Trasa pomiarowa poślizgowości nawierzchni na ul. Skalnicowej w Warszawie

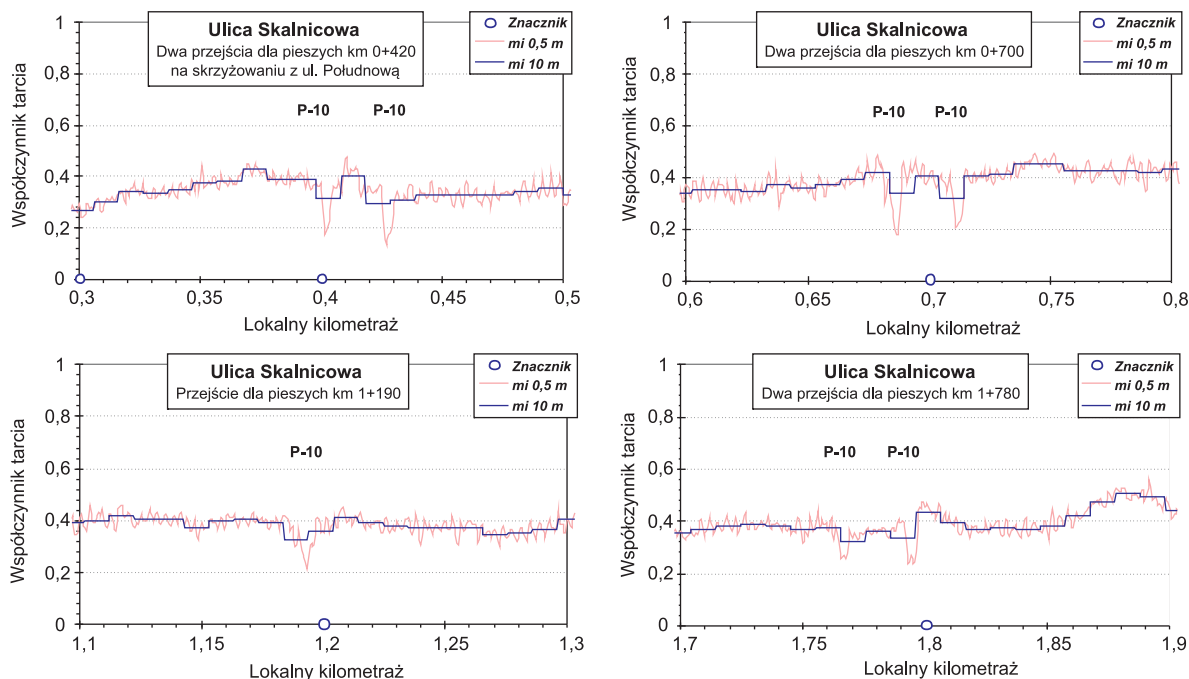
stałą prędkością $V = 60$ km/h na prawym pasie ruchu pomiędzy dwoma rondami od ul. Trakt Lubelski (km 0+000) w kierunku do ul. Zasadowej (km 2+010) o długości ok. 2,01 km, rysunek 5. Stan nawierzchni jezdni pod względem równości według klasyfikacji SOSN dróg krajowych klasy G jest dobry (klasa A, $IRI/1000 < 3,0$ mm/m, [21]).

Założonym celem badań było rozpoznanie wielkości zmian współczynnika tarcia na oznaczonych na nawierzchni białą farbą przejściach dla pieszych (P-10), potocznie zwanych „zebrą”, fot 4. Ze względu na wymiary namalowanych pasów o długości 4,0 m i szerokości 0,5 m, pomiary wykonano z krokiem pomiarowym 0,5 m, co względem standardowej jego wielkości (10 m) znacznie poprawiło szczegółowość rozpoznania poślizgowości w miejscach lokalizacji oznakowania poziomego. Wyniki badań pokazano na wykresach, rysunki 6 i 7.

Z tych wykresów można odczytać, iż zastosowana tutaj farba do wykonania na nawierzchni jezdni oznakowania poziomego przejść dla pieszych w sposób znaczący zmniejsza



Rys. 6. Zestawienie wyników badań poślizgowości nawierzchni na ul. Skalnicowej w Warszawie



Rys. 7. Zestawienie wyników badań poślizgowości nawierzchni w pobliżu oznakowanych przejść dla pieszych typu „zebra” (4,0 m x 0,5 m) na ul. Skalnicowej w Warszawie



Fot. 4. Oznakowanie poziome przejścia dla pieszych na skrzyżowaniu ulic Skalnicowej i Południowej

wartości współczynników tarcia. A to oczywiście skutkuje zwiększeniem długości drogi hamowania samochodu z powodu niekorzystnego przeciwdziałania poziomej sile bezwładności (chwilowo) mniejszą siłą oporu koła toczącego podczas wymuszonego (zwiększonego) poślizgu opony po nawierzchni. Czyli miejsca o lokalnie większej śliskości nawierzchni stanowią potencjalne zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu pojazdów, szczególnie gdy znajdują się one bezpośrednio w strefie skrzyżowań ulic (dróg), gdzie często są wykonywane (gwałtowne) manewry hamowania.

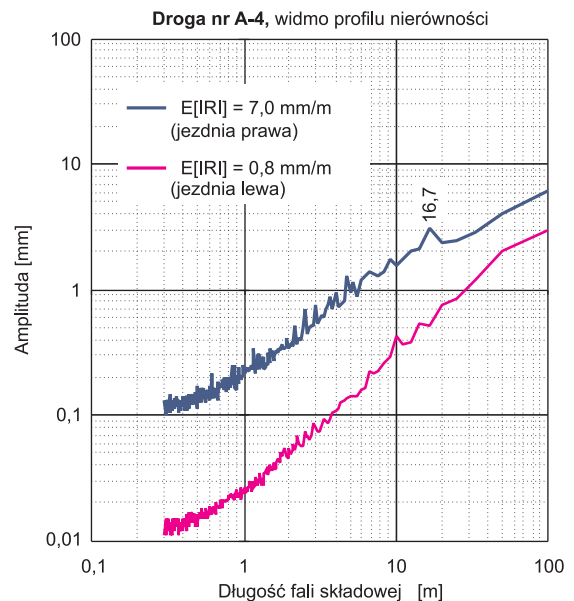
Przykład analizy widmowej nierówności nawierzchni betonowej

Pomiary równości nawierzchni na potrzeby oceny stanu technicznego wykonuje się przy użyciu specjalistycznych urządzeń profilometrycznych, które w określony sposób rejestrują profil nierówności podłużnych. Jak wiadomo, wyznaczona na jego podstawie odcinkowa ocena równości stanowi zagregowaną postać informacji o wpływie nierówności nawierzchni na warunki ruchu pojazdów. Okazuje się, że zastosowanie wybranych metod analizy widmowej do badań cyfrowego zapisu profilu nierówności podłużnych pozwala rozpoznać źródło oddziaływań typu periodycznego, czyli takich, jakich można doznać podczas jazdy pojazdu, np. po nawierzchni z płyt betonowych (elementów prefabrykowanych, itp.), [15]. Jak wynika z charakterystyki dynamicznej modelu pojazdu samochodowego (rysunek 1), fale krótkie sprzyjają rezonansowi koła, a fale długie rezonansowi nadwozia.

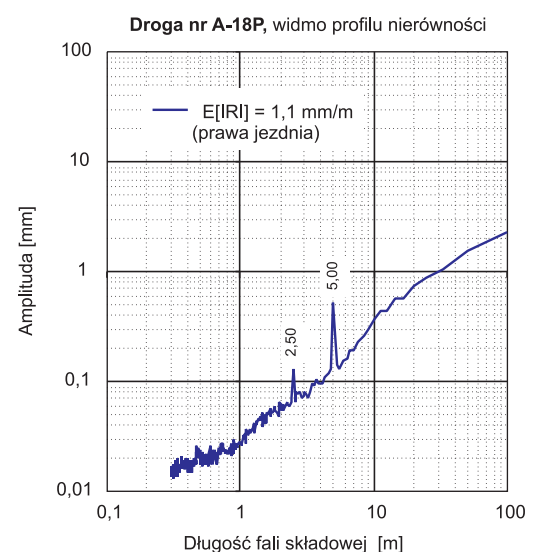
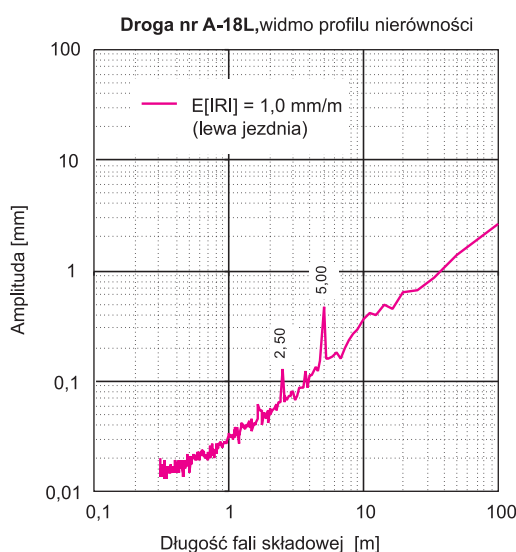
Na podstawie wyników analiz zapisów rzędnych profilu nierówności dla różnych typów nawierzchni drogowych można wyróż-

nić oscylujące wokół zera nierówności o charakterze: impulsowym, ciągłym, odcinkowo ciągłym, okresowym i nieokresowym. Najczęściej spotyka się jednak nierówności o charakterze mieszanym. Przy czym dla użytkowników pojazdów najbardziej uciążliwe są te odcinki dróg, gdzie występują powtarzające się nierówności nawierzchni. Na ogół ich regularność jest usprawiedliwiona warunkami techniczno-technologicznymi, na przykład takimi jak: dylatacje, połączenia, wymiary elementów budowlanych, czy przyjęty sposób tyczenia realizacyjnej siatki punktów niwelety drogi itp.

W rozważaniach teoretycznych na temat kinematycznego oddziaływania drogi na jadący pojazd, jako układ dynamiczny, na ogół przyjmuje się, że profil podłużny jezdni



Rys. 8. Przykład dwóch widm amplitudowych nawierzchni w stanie dobrym i w stanie złym. Na osi OX odłożono długości fal składowych λ_p a na osi OY odpowiadające im wartości średnie amplitud A_i dla $m = 40$ odcinków o długości $l_0 = 100$ m, które połączono linią ciągłą. Oznaczenie E(IRI) odpowiada wartości średniej wskaźnika równości



Rys. 9. Przykład dwóch widm amplitudowych nowej nawierzchni jezdni z betonu cementowego wykonanej z płyt o długości 5 m.

jest pewną funkcją sinusoidalną. Natomiast w rzeczywistości tworzy go odpowiedni zbiór fal nierówności o losowych długościach, amplitudach i fazach. Dominacja niektórych z nich może informować o różnych defektach nawierzchni, dotyczących jej trwałości, bezpieczeństwa ruchu i komfortu jazdy pojazdów. W celu ujawnienia tego typu nierozpoznawalnych wizualnie zdarzeń, dany zapis profilu nierówności podłużnych nawierzchni można przetworzyć na dyskretny zbiór składowych harmonicznych określony za pomocą zbioru amplitud dla odpowiednio zdefiniowanych długości (widmo amplitudowe). Jak wiadomo, to funkcję o skończonej liczbie obserwacji ($2n < \infty$) w przedziale $[0, l_0]$, przy określonych założeniach, można aproksymować szeregiem Fouriera, w celu znalezienia dyskretnego rozkładu (widma) amplitud i długości fal dla określonej rodziny składowych funkcji harmonicznych. Tak więc, każdy zapis profilu nierówności nawierzchni na odcinku drogi o długości l_0 można przedstawić jako skończoną sumę funkcji harmonicznych o różnych amplitudach A_j dla zadanych długości fal składowych $l_j = l_0 / j$ (dla $j = 1, 2, \dots, n$). Jak pokazano na wykresie, rysunek 8, większym długościom fal składowych odpowiadają większe amplitudy. Ogólny poziom amplitud w przypadku nawierzchni asfaltowej o równości w stanie dobrym jest niższy niż w przypadku zniszczonej nawierzchni betonowej o równości w stanie złym. Dla porównania pokazano na rysunku 9 dwa wykresy widma amplitudowego nawierzchni z betonu cementowego na dwujezdniowym odcinku autostrady A18, która pod względem równości podłużnej według klasyfikacji SOSN należy do klasy A oraz według RMTiGM spełnia wymagania odbiorcze nowych nawierzchni dróg klasy A, S i GP. Rozmieszczone co 5 m poprzeczne szczeliny dylatacyjne zaznaczyły się w zapisie widma profilu nierówności podłużnych obecnością dwóch fal składowych o znacznie większych amplitudach w przypadku długości 5 m i 2,5 m.

Podsumowanie i wnioski

Na ogół rozpoznanie stanu nawierzchni jezdni jest wykonywane okresowo tylko na potrzeby zarządców sieci dróg publicznych w celu prowadzenia przez nich efektywnej gospodarki przydzielonymi środkami na bieżące utrzymanie oraz budowę nowych i remonty zużytych (zniszczonych) odcinków dróg. Kompleksowe pomiary różnych właściwości nawierzchni drogowych wykonuje się przy użyciu nowoczesnych i wysokowydajnych urządzeń pomiarowych. W wyniku agregacji zarejestrowanych zbiorów danych o stanie nawierzchni jezdni na potrzeby systemowej oceny są tracone pewne szczegółowe zapisy miejsc osobliwych, które przy wykorzystaniu niestandardowych metod przetwarzania wyników z wybranych odcinków dróg mogą być z powodzeniem wykorzystane w diagnostyce nawierzchni jezdni w miejscach zdarzeń drogowych. Z punktu widzenia użytkownika drogi, to równość i poślizgowość nawierzchni jezdni stanowią bezpośrednio o komforcie i bezpieczeństwie jazdy pojazdu jako układu dynamicznego, a istniejące lokalnie wady (odciążenie koła bądź śliskość powierzchni) mogą być przyczyną różnych kolizji i wypadków drogowych, dlatego powinny być one systematycznie diagnozowane i niezwłocznie naprawiane przez służby drogowe.

Bibliografia

- [1] *Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie*, Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 roku (Dz. U. Nr 43, poz. 430), z późn. zm., ostatnia przez Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 17 lutego 2015 roku (Dz. U. poz. 329)
- [2] *Przepisy techniczno-budowlane dotyczące autostrad płatnych*, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 stycznia 2002 roku (Dz. U. Nr 12, poz. 116)
- [3] *System Oceny Stanu Nawierzchni „SOSN”*, wytyczne stosowania, GDDP BSSD, Warszawa, luty 2002
- [4] *Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów*, Wytyczne stosowania, Zarządzenie nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 30 kwietnia 2015 roku.
- [5] R. Czajka, *Kryteria oceny stanu technicznego układu zawieszania pojazdu według metody EUSAMA*, referat w materiałach z III Konferencji „Badania techniczne pojazdów w świetle obowiązujących przepisów – 2002”, ITS, Mikołajki, 23–25 października 2002
- [6] D. Godlewski, *Równość nawierzchni jako parametr oceny jakości dróg*, Skrypt, WPW, Warszawa 1989
- [7] D. Godlewski, *Zagadnienia systemowe związane z utrzymaniem jezdni drogowych*, WPW, Warszawa 1991
- [8] D. Godlewski, *Nawierzchnie drogowe*, Skrypt, WPW, Warszawa 2011
- [9] D. Godlewski, S. Szpinek, *Pomiary (nie)ciągłe współczynnika tarcia nawierzchni drogowych urządzeniem TWO*, „Drogownictwo” 3/2015
- [10] M.W. Sayers, S.M. Karamihis, *The Little Book of Profiling. Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*, October 1996
- [11] S. Szpinek, *Nadzór merytoryczny nad pomiarami równości podłużnej i głębokości koleiny – badania porównawcze urządzeń pomiarowych*, zbiór corocznych raportów dla GDDKiA (dawniej GDDP), Warszawa, 1995–2013
- [12] S. Szpinek, *Ocena równości podłużnej nawierzchni dróg krajowych pomiarami jedno- i wielotorowymi*, „Drogownictwo” 1/2000
- [13] S. Szpinek, *(Nie)równość miarą (zu)życia nawierzchni jezdni drogi*, „Drogownictwo” 6/2000
- [14] S. Szpinek, *Ocena równości nawierzchni wskaźnikami IRI*, „Drogownictwo” 10/2000
- [15] S. Szpinek, *Widmo amplitudowe nierówności podłużnych nawierzchni drogowych*, artykuł recenzowany przez prof. dra hab. inż. Antoniego Szydłę, „Drogownictwo” 9/2001
- [16] S. Szpinek, *Wielość ocen i „nierówne” autostrady w Polsce* (artykuł dyskusyjny), „Drogownictwo” 1/2002
- [17] S. Szpinek, *Współczynnik dynamiczności obciążenia dla nierównej nawierzchni jezdni od poruszającego się po niej modelu pojazdu samochodowego*, materiały z VIII Międzynarodowej Konferencji nt.: *Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe*, Kielce, 7–8 maja 2002
- [18] S. Szpinek, *Statystyczna metoda rozpoznawania odcinków jednorodnych*, część I. Założenia teoretyczne, część II. Przykłady zastosowań w badaniach równości nawierzchni, „Drogownictwo” 10 i 11/2012
- [19] S. Szpinek, *Niepewność oceny równości nawierzchni drogowej*, „Drogownictwo” 3/2013
- [20] S. Szpinek, *Przeglądarka WI do wizualizacji zbiorów danych z ocenami podłużnej równości nawierzchni drogowej*, program PWI Demo v.1.0, Instrukcja obsługi, *Polska Inżynieria*, Warszawa, kwiecień 2013
- [21] S. Szpinek, *Ocena podłużnej równości warstwy ścieralnej nawierzchni jezdni na dwóch jednojezdniowych odcinkach ulicy Panny Wodnej [Skalicowej] w Warszawie*, opracowanie własne, *Polska Inżynieria*, Warszawa, 12 maja 2015
- [22] S. Szpinek, *Notatka nr 1/Gk/2015 z rozpoznawczych badań porównawczych urządzeń różnych typów do pomiaru poślizgowości nawierzchni jezdni na odcinku testowym (dawna dk nr 7 od km 31+500 do km 32+500, prawy pas ruchu), jakie zostały zorganizowane przez WT GDDKiA w Gdańsku w dniu 06 sierpnia 2015 roku*, materiały niepublikowane, *Polska inżynieria*, Warszawa, 20 sierpnia 2015