



DARIUSZ GODLEWSKI

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



STANISŁAW SZPINEK

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

Równość nierówności drogi, czyli co warto (po)wiedzieć o *IRI*

Równość w profilu podłużnym nawierzchni jest cechą eksploatacyjną drogi, która w odczuciu użytkownika pojazdu wyraża jej zdolność do niewzbudzania wstrząsów i drgań [6]. W praktyce, każda droga posiada ukształtowany indywidualnie profil nierówności nawierzchni jezdni, gdzie czasem na specjalną uwagę może zasługiwać nierówność maksymalna. Jest to spowodowane faktem,

że w przepisach dotyczących bezpośrednio warunków użytkowania dróg występuje termin „duża nierówność”, który odnosi się do określenia miejsca potencjalnie niebezpiecznego dla ruchu lub obniżającego komfort jazdy pojazdów na odpowiednio oznakowanym odcinku drogi [3]. W szczególności podkreśla się, by było ono przejezdne z ustaloną prędkością graniczną przez samochód osobowy o średniej wielkości bez wyraźnej niedogodności i zagrożenia bezpieczeństwa ruchu, zaś jego położenie na drodze musi być poprzedzone znakiem ostrzegawczym „nierówna nawierzchnia” (A-11) albo przed urządzeniem bezpieczeństwa ruchu drogowego (U-16 i U-17) „próg zwalniający” (A-11a). Znaki te są ustawiane łącznie z tabliczką określającą odległość dojazdu (T-1) lub długość przejazdu (T-2) i zazwyczaj razem z umieszczonym poniżej znakiem zakazu „ograniczenie prędkości” (B-33). Niektóre z występujących na drodze deniwelacji nawierzchni jezdni mogą być oznaczone znakiem ostrzegawczym „inne niebezpieczeństwo” (A-30) łącznie z tabliczką wyjaśniającą, np. „przełomy”, „wyboje” (T-3), oraz znakiem B-33.

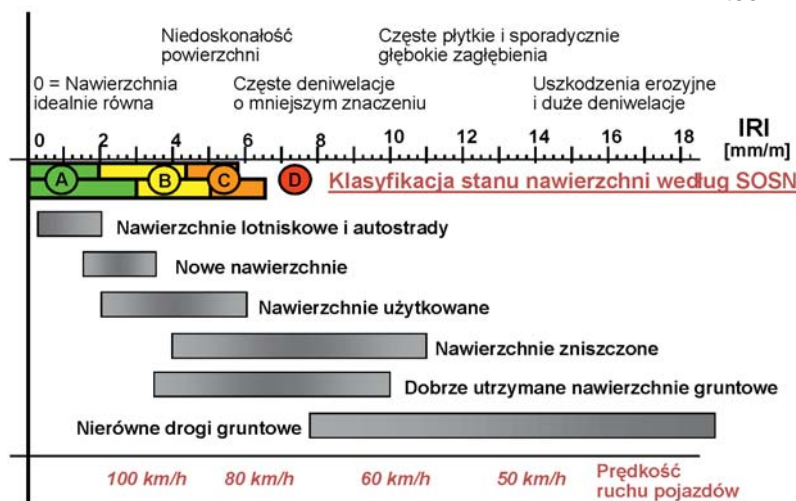
W ocenie wielkości deformacji powierzchni jezdni wymagającej oznakowania powinny być brane pod uwagę jej wymiary, lokalizacja oraz ogólny standard drogi, który im jest wyższy, tym mniejszą nierówność należy oznakować i w takiej odległości, by kierujący pojazdem mógł przed nią odpowiednio wcześniej zwolnić. Poza celowo wykonywanym *wygarbieniem* w postaci progów zwalniających i podrzutowych, każda „naturalnie” ukształtowana zmiana profilu podłużnego na niewielkiej długości odcinka nawierzchni jezdni ujawnia zwykle wadę (nieciągłość) jej konstrukcji, jaka występuje najczęściej w sąsiedztwie obiektów inżynierskich, np. mostu, wiaduktu, przejazdu kolejowego, przepustu, skrzyżowania itp. Nierówność nawierzchni z reguły jest wypadkową niekorzystnego oddziaływania lokalnych czynników związanych z warunkami posadowienia, odwodnienia, technologią, ja-

kością wykonania, wielkością obciążenia, poziomem zniszczeń oraz napraw. Nierówności tego rodzaju na ogół nie podlegają oddzielnej kwalifikacji pod względem równości. Zarządcy drogi pozostawiają swobodę decyzji w sprawie ich rozpoznawania oraz oznakowania, stałego bądź tymczasowego w oczekiwaniu na remont (naprawę) albo czasami działania wymuszonego wskutek zaistnienia w takim miejscu na drodze udokumentowanej szkody użytkownika pojazdu lub zdarzenia drogowego. Obecnie, w związku z rozwojem specjalistycznych urządzeń pomiarowych, w rozwiązywaniu tego typu zadań diagnostycznych na potrzeby organizacji ruchu drogowego można posłużyć się cyfrowym zapisem profilu podłużnego nierówności nawierzchni jezdni i matematycznym modelem pojazdu samochodowego, z których korzysta się w standardowych obliczeniach umownej wielkości *IRI* (ang. *International Roughness Index*), jako uznanej na świecie miary podłużnych nierówności nawierzchni dróg i powszechnie nazywanej *międzynarodowym wskaźnikiem równości* lub skrótowo *wskaźnikiem równości*, np. [8], [9], [15], [16], [18] i [20]. W drogownictwie są stosowane różne skale kwalifikujące nierówności powierzchni jezdni według wartości *IRI* w odniesieniu zarówno do jakości wykonania nawierzchni nowej (badania odbiorcze), [1] i [2], jak i do poziomu zużycia nawierzchni użytkowanej (badania systemowe), [6], [7] i [14], jednak ocena równości „dużej nierówności” w aspekcie bezpieczeństwa ruchu pojazdów pozostaje poza zakresem rozpoznania służb drogowych.

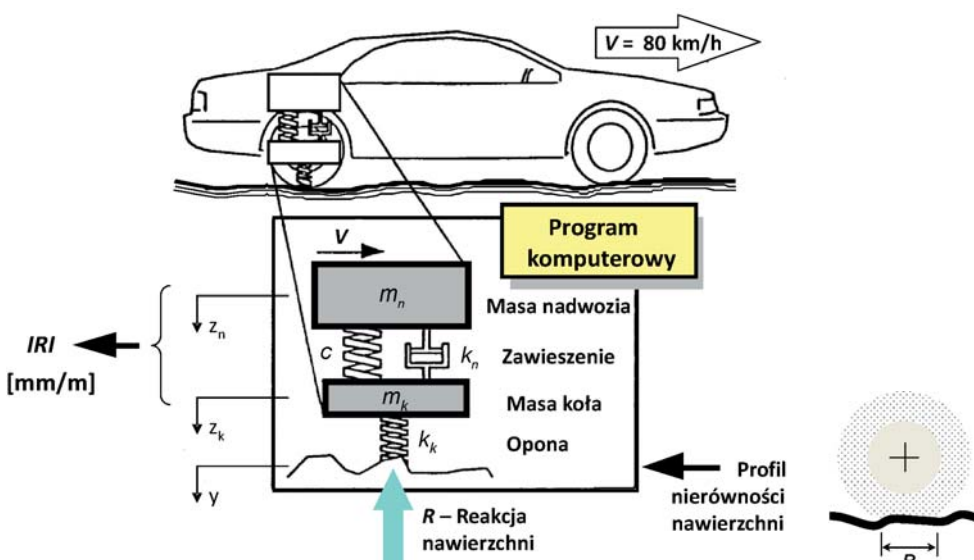
W artykule przedstawiono kilka wybranych przykładów analiz porównujących wyniki badań symulacyjnych oddziaływania kinematycznego profilu nierówności nawierzchni jezdni na wielkość jej obciążenia dynamicznego, a także innych ustalonych parametrów w odniesieniu do pojęć „niedogodność” czy „zagrożenie bezpieczeństwa” ruchu, jakie występują podczas przejazdu samochodu przez różnie ukształtowane nierówności drogi przy założonych prędkościach granicznych. W obliczeniach *IRI* posłużono się standardowym modelem osi pojazdu osobowego, jaki jest stosowany do oceny równości profilu nawierzchni drogowej, np. [14] i [21]. Na potrzeby wielowariantowych badań reakcji pojazdu na symulowane warunki ruchu rozszerzono zakres jego zastosowań, m.in. o możliwości obserwacji wielkości obciążenia dynamicznego nawierzchni [19], widma amplitudowego [17], zjawisk towarzyszących chwilowej utracie kontaktu opony z nawierzchnią, a także przejazdowi po zadanym profilu drogi ruchem niejednostajnym podczas rozpędzania czy hamowania samochodu, jako układu dynamicznego, np. [10].

Ogólna klasyfikacja równości nawierzchni dróg według wartości IRI

Zwieńczeniem zakończonych pod koniec ubiegłego wieku prac naukowo-badawczych, np. [12] i [13], jakie były prowadzone na zlecenie Banku Światowego (BS) w celu harmonizacji wielu preferowanych wówczas w różnych krajach metod pomiaru i kwalifikacji nawierzchni drogowych pod względem równości podłużnej, było opracowanie uniwersalnej procedury badawczej, w której za pomocą jednej wielkości IRI skojarzono skalę oceny zużycia nawierzchni z ogólnym opisem stanu uszkodzeń powierzchni jezdni oraz bezpieczną prędkością ruchu pojazdów na drogach o różnym standardzie użytkowania (rys. 1). Na opracowanej gra-



Rys. 1. Ogólna skala klasyfikacji równości nawierzchni według wielkości IRI, np. [13], [16], w której klasy wg SOSN (DSN) odpowiadają czterem opisowym ocenom stanu technicznego: dobry (A), zadowalający (B), niezadowalający (C) oraz zły (D), dla ustalonych w Polsce dwóch grup standardów dróg publicznych [6]



Rys. 2. Schemat dynamicznego modelu osi pojazdu samochodowego do obliczeń IRI przy założonej stałej prędkości przejazdu $V = 80 \text{ km/h}$ i długości śladu koła $B = 0,25 \text{ m}$, [13], [16] i [19]

ficznie skali oceny równości nawierzchni pokazano zakresy zmienności IRI dla wybranych kategorii dróg. Na wykresie porównano również kryteria oceny stanu zużycia dróg publicznych, jakie są stosowane w Polsce według wytycznych SOSN (DSN), [6].

Nowością było to, iż całkowicie odstąpiono od zajmowania się samą nierównością, jako obiektem statycznym, na rzecz oceny uciążliwości i zagrożenia bezpieczeństwa ruchu, jaką może stanowić dla użytkowników drogi jej obecność w profilu nawierzchni. Na podstawie analizy wyników pomiaru rzędnych otrzymanych z różnych typów urządzeń profilometrycznych założono, że nierównością nawierzchni drogowej jest takie ukształtowanie powierzchni, które sprzyja zakłóceniu płynności ruchu w jadącym z określoną prędkością samochodzie osobowym. Zaproponowano przy tym, by nie był to pojazd rzeczywisty o żądanych parametrach technicznych, ale odpowiadający pojazdowi matematyczny model układu dynamicznego (ang. *The Golden Car*), (rys. 2).

Ostatecznie ustalono, że międzynarodowy wskaźnik równości (IRI, mm/m lub m/km), jako miara poziomu nierówności drogi, charakteryzuje względną wielkość oscylacji układu zawieszenia wokół stanu statycznej równowagi w przyjętym modelu osi pojazdu samochodowego o dwóch stopniach swobody podczas symulowanego przejazdu ze stałą prędkością, $V = 80 \text{ km/h}$, po określonym w postaci cyfrowej podłużnym profilu nierówności nawierzchni, jaki w tym celu opisuje się za pomocą zbioru równoodległych rzędnych (mm), z krokiem odpowiadającym oszacowanej średniej długości śladu opony, $B = 0,25 \text{ m}$.

Jednostkowa wartość IRI (tutaj oznaczona $dIRI$) jest wyznaczana do pojedynczego kroku obliczeniowego i równa się ilorazowi prędkości ugięcia układu zawieszenia (mm/s lub m/h) do założonej prędkości jazdy (m/s lub km/h). Otrzymany wynik (mm/m lub m/km) w praktyce określa stosunek wielkości wychylenia układu zawieszenia (mm lub m) do przejechanej w tym czasie odległości (m lub km), gdzie wartość dodatnia odpowiada ścisnaniu, a wartość ujemna rozciąganiu tego układu.

Wskaźnik równości nawierzchni, jako ocena odcinkowa IRI, odpowiada wartości przeciętnej wychylenia, którą oblicza się dla zbioru $|dIRI|$ o liczności n , tak samo, jak średnią arytmetyczną, gdy wszystkim składnikom sumy przypisze się znak dodatni. Długość ocenianego odcinka drogi (L) według wartości IRI, jaką przyjmuje się w ocenie równości nawierzchni, stanowi wielokrotność kroku próbkowania $n \times B$. W Polsce minimalna długość takiego odcinka wynosi 50 m. Zwykle wartość IRI, jako ostateczny wynik oceny rów-

ności nawierzchni dla badanego odcinka drogi, podaje się w postaci liczby dziesiętnej z rozdzielczością ograniczoną do jednego miejsca po przecinku, a w obliczeniach pośrednich, co najmniej do dwóch miejsc po przecinku.

Ogólna charakterystyka modelu osi pojazdu samochodowego

Nierówności powierzchni jezdni, zgodnie z opracowaną dla Banku Światowego (BS) procedurą oceny równości nawierzchni drogowych, są składowymi rzeczywistego profilu drogi (y), na które reaguje układ zawieszenia, czyli połączone równolegle amortyzator (c) z resorem (k_n), w jadącym z założoną prędkością (V) modelu osi pojazdu samochodowego z kołem ogumionym (k_k), według pokazanego schematu na rysunku 2. Wielkość oscylacji, w zależności od stopnia zróżnicowania profilu drogi, jako funkcji wymuszającej, stanowi wypadkową generowanych jednocześnie ze zmiennym nasileniem sił bezwładności przez połączone dwie masy, tj. nieresorowaną masę koła (m_k) i resorowaną masę nadwozia (m_n). Ponieważ podstawowym zadaniem układu zawieszenia jest tłumienie amplitud prędkości drgań i wstrząsów pochodzących bezpośrednio od toczącego po nierównościach nawierzchni jezdni koła (\dot{z}_k) oraz od prędkości wychylenia nadwozia względem stanu statycznej równowagi (\dot{z}_n), którą odczuwa użytkownik pojazdu, to różnica tych dwóch prędkości przemieszczeń ($\dot{q} = \dot{z}_n - \dot{z}_k$) jest ustaloną miarą równości nawierzchni jezdni. Na odcinku drogi o profilu idealnie równym układ zawieszenia pozostaje w spoczynku ($\dot{q} = 0$), a im nawierzchnia jest mniej równa, tym będą generowane większe jego wychylenia ($\dot{q} \neq 0$), adekwatne do wielkości udziału składowych nierówności powierzchni jezdni.

Pionowe drgania pięciu wyróżnionych elementów (m_n, m_k, c_n, k_n, k_k) w obliczeniowym modelu osi pojazdu o określonych, jak dla samochodu osobowego, stałych relacjach:

$$c/m_n = 6 \quad k_n/m_n = 63,3 \quad k_k/m_n = 653 \quad m_k/m_n = 0,15 \quad (1)$$

który zachowując przez cały czas ciągłość kontaktu koła z nawierzchnią porusza się po zadanym profilu drogi (y) z prędkością V , opisuje się układem dwóch równań różniczkowych zwyczajnych drugiego rzędu:

$$m_n \ddot{z}_n + c \dot{z}_n + k_n z_n = 0 \quad (2a)$$

$$m_k \ddot{z}_k + k_k z_k - c \dot{z}_n - k_n z_n = y(t) \quad (2b)$$

Obliczone wielkości ugięć statycznych modelu pojazdu na podstawie relacji (1) wynoszą odpowiednio w przypadku koła $u_{stat.} = 17,27$ mm, zawieszenia $q_{stat.} = 154,92$ mm i ich suma w przypadku nadwozia $z_{n,stat.} = u_{stat.} + q_{stat.} = 172,19$ mm.

Jedynym źródłem drgań dla poszczególnych elementów w tym modelu pojazdu jest kinematyczny profil nierówności nawierzchni jezdni, $y(t) = f(x, V)$, który może być określony w postaci dyskretnej za pomocą zbioru rzędnych (mm), jakie otrzymuje się w wyniku próbkowania z ustalonym krokiem funkcji analitycznej (np. w badaniach teoretycznych) albo rzeczywistej powierzchni jezdni urządzeniem profilometrycznym.

Otrzymane wyniki z rozwiązania układu równań ruchu (2a i 2b) mogą być wykorzystane do badań odpowiednio zdefi-

niowanych parametrów opisujących wzajemne oddziaływania profilu nierówności nawierzchni na jadący pojazd i odwrotnie, pojazdu na nawierzchnię. Zgodnie z ustaloną procedurą obliczeniową, wskaźnik równości (IRI) wyznacza się według wzoru (3). Użyteczne w diagnostyce nawierzchni mogą być ponadto inne parametry, np. współczynnik dynamiczności (WD) według wzoru (4) i tzw. współczynnik niedogodności (WN) według wzoru (5).

$$IRI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |dIRI_i| = \frac{1}{n \cdot V} \sum_{i=1}^n |\dot{q}_i| = \frac{1}{n \cdot V} \sum |\dot{z}_{n,i} - \dot{z}_{k,i}| \quad (3)$$

$$WD_i = \frac{u_i}{u_{stat.}} = \frac{z_{k,i} - y_i}{u_{stat.}} \quad (4)$$

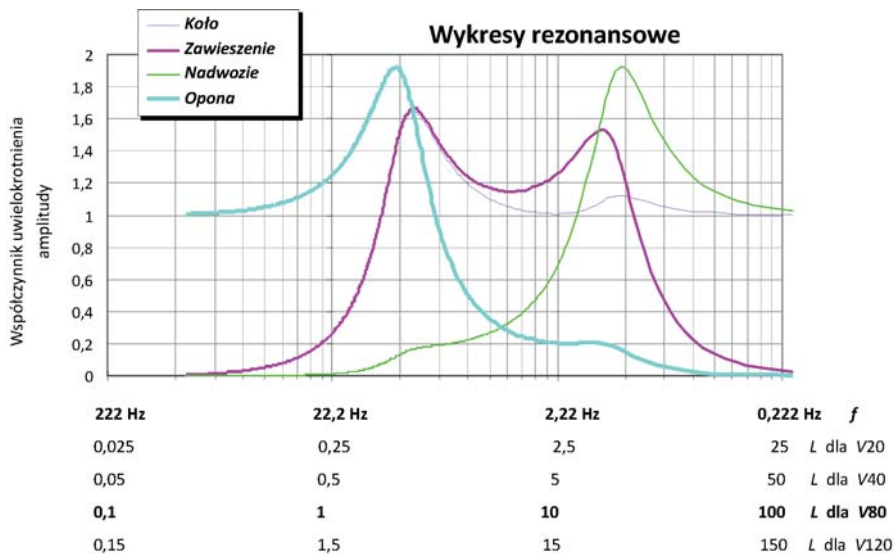
$$WN_i = \frac{\dot{z}_{n,i}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot z_{n,stat.}}}, \text{ gdzie } g = 9806,65 \text{ mm/s}^2 \quad (5)$$

Bezwymiarowy współczynnik dynamiczności obciążenia, w skrócie *współczynnik dynamiczny*, określa stosunek dynamicznej siły reakcji nawierzchni od jadącego pojazdu ($R_i = k_k \times u_i$) w danym punkcie drogi (x_i) do wielkości obciążenia statycznego ($R_{stat.}$, dla $V = 0$, to $WD = 1$). W ocenie niejednorodności obciążenia nawierzchni na badanym odcinku drogi będą mieć praktyczne znaczenie dwie ekstremalne jego wartości. Współczynnik WD_{max} , gdy chodzi o ocenę nośności konstrukcji nawierzchni (przeciążenie, niedociążenie, wymiarowanie, itp.) oraz współczynnik WD_{min} , gdy chodzi o ocenę ryzyka utraty kontaktu koła z nawierzchnią (bezpieczeństwo ruchu, długość drogi hamowania itp.). Stan odpowiadający oderwaniu się opony od nawierzchni będzie występować w przypadku, gdy $R < 0$, to $WD < 0$.

Bezwymiarowy współczynnik niedogodności określa stosunek prędkości wychylenia nadwozia w danym punkcie drogi (x_i) do prędkości swobodnego spadku z wysokości odpowiadającej ugięciu statycznemu ($z_{n,stat.}$) i jest on względną miarą wielkości wstrząsu nadwozia pojazdu obliczeniowego. Praktyczne znaczenie będą miały dwie ekstremalne wartości współczynnika niedogodności (WN_{min} i WN_{max}), wartość dodatnia odpowiadająca kierunkowi opadania zgodnemu z grawitacją, a wartość ujemna podrzutowi ku górze.

Na wykresie rezonansowym (rys. 3) pokazano wyznaczone cztery przebiegi krzywych uwielokrotnienia amplitudy drgań w ruchu ustalonym dla: koła (z_k), zawieszenia ($q = z_n - z_k$), nadwozia (z_n) i opony ($u = z_k - y$), które zostały wymuszone funkcją sinusoidalną (y) o stałej amplitudzie i częstotliwości (f) z przedziału od 0,1 Hz do 100 Hz, czyli 10^m Hz, dla m od -1 do 2 , co 0,01. Przedział ten w pełni pokrywa określone częstotliwości drgań własnych dla koła ($f_k \approx 9,65$ Hz, $L_{k,v80} \approx 2,3$ m) i nadwozia ($f_n \approx 1,14$ Hz, $L_{n,v80} \approx 19,5$ m).

Charakterystyka dynamiczna układu zawieszenia w standardowym modelu osi pojazdu samochodowego przy $V = 80$ km/h, jaki stosuje się w obliczeniach wartości IRI , jest krzywą *bimodalną* i wyznacza niezbędny zakres długości w przypadku tzw. fal nierówności nawierzchni jezdni z przedziału od ok. 0,5 m do ponad 100 m, jako składowych profilu podłużnego drogi, które powinny być rejestrowane przez profilometryczne urządzenia pomiarowe wykorzystywane na potrzeby oceny równości.



Częstotliwość (f , Hz) i długość fali nierówności nawierzchni (L , m) dla czterech prędkości (V , km/h)

Rys. 3. Charakterystyki dynamiczne elementów składowych modelu osi pojazdu samochodowego służącego do obliczeń IRI przy różnych prędkościach przejazdu

Zgodnie z założeniem, wskaźnik równości łączy w sobie dwie oceny o różnej czułości, jako wielkości charakteryzujące w jadącym pojeździe wielkości ustalonych drgań koła i nadwozia rozpiętych wokół dwóch wartości dominujących ($f_{zk} \approx 9,67$ Hz, $L_{zk,V80} \approx 2,3$ m i $f_{zn} \approx 1,42$ Hz, $L_{zn,V80} \approx 15,7$ m). Należy podkreślić, że im wolniejszy będzie przejazd pojazdu obliczeniowego po tym samym sinusoidalnym profilu nierówności drogi (statycznym), tym większa będzie odpowiadać mu długość fali wymuszenia kinematycznego. Zakres wrażliwości poszczególnych elementów modelu dynamicznego pojazdu na profil nierówności nawierzchni jezdni zależy od prędkości V .

Dane do wykresów rezonansowych (rys. 3) otrzymano z numerycznych obliczeń, wykonanych za pomocą programu komputerowego RKG, który wykorzystywano w przeszłości przy realizacji prac badawczych dotyczących oceny równości nawierzchni.

Walidacja programu RKG do badań modelu pojazdu w ruchu ustalonym

Do rozwiązania układu równań (2a i 2b), ze względu na cyfrową postać zapisu rzeczywistych danych wejściowych, $y(t)$, zastosowanie mają określone metody numeryczne. W literaturze są podane przykładowe algorytmy programów komputerowych do obliczeń IRI, np. [4] i [13], które w postaci odpowiednio skompilowanych aplikacji znajdują się w pakietach programów przetwarzających dane z urządzeń profilometrycznych. Pewną niedogodnością jest to, że korzystający z nich użytkownik, bez informacji o założeniach metody i strukturze programu, ma ograniczony zakres możliwości poprawnego wykonywania obliczeń wariantowych przy inaczej określonych warunkach ruchu modelu pojazdu niż te, do których algorytmy opracowano.

W związku z potrzebą stosowania w Polsce specjalistycznego oprogramowania do potokowego przetwarzania da-

nych pomiarowych profilu nierówności podłużnych nawierzchni pochodzących z różnych urządzeń pomiarowych, np. [14], został opracowany i przetestowany, w ramach pakietu programów MAGDA, algorytm do rozwiązywania układu równań różniczkowych zwyczajnych na podstawie założeń metody jednokrokowej Rungego-Kutty-Gilla. Zaletą podanej metody numerycznej jest to, poza prostotą algorytmu, że można po każdym kroku obliczeniowym obserwować na bieżąco wartości wybranych parametrów, kontrolować dokładność obliczeń oraz określać ich wartości początkowe w przypadku kroku następnego. Stwarza to szerokie możliwości poznawcze do pewnych jego nietypowych zastosowań, np. do kontroli ciągłości kontaktu koła z nawierzchnią, czy sterowania prędkością jadącego modelu pojazdu, jak również do innych symulacyjnych badań dla zmiennych w czasie lub nieciągłych warunków ruchu samochodu obliczeniowego. Dokładność wyników obliczeń zależy

od długości kroku obliczeniowego (B), im jest on mniejszy, tym uzyskuje się większą zgodność z hipotetyczną wartością rzeczywistą.

W celu przeprowadzenia walidacji programu komputerowego RKG pod kątem dokładności i stabilności rozwiązań przy tak samo określonych warunkach ruchu modelu pojazdu samochodowego, w analizie porównawczej posłużono się zbiorami wyników obliczeń analitycznych i numerycznych, jakie pokazano na wykresach krzywych rezonansowych dla nadwozia i koła (rys. 3). W obliczeniach teoretycznych wielkości amplitud dla oscylujących mas nadwozia i koła w ruchu ustalonym skorzystano z ogólnych wzorów, które są podane w publikacji [12] dla równoważnego modelu układu dynamicznego na harmonicznie drgającym podłożu o założonej częstotliwości (f , Hz). Odpowiadające im amplitudy z obliczeń numerycznych dotyczą przedziału drgań ustalonych, jaki występuje po przejechaniu tzw. *odcinka dojazdowego*, gdzie wytłumieniu podlegają nieustalone drgania początkowe. Z porównania obu zbiorów danych obliczeniowych wynika, że niepewność standardowa w przypadku współczynników uwielokrotnienia amplitudy w ruchu ustalonym drgań nadwozia i koła w całym przedziale f wynosi 0,0004, zaś moduł największej różnicy równa się 0,0030. Można na tej podstawie uznać, że wyniki obliczeń numerycznych i analitycznych są w pełni zgodne, gdyż występujące różnice są znacznie mniejsze od przyjętego dla nich zakresu rozdzielczości liczb. Z tego wynika także, że uzyskane z programu RKG zbiory danych numerycznych do pokazanych na wykresie rezonansowym dwóch pozostałych przebiegów krzywych, a odpowiadających ustalonym drganiom układu zawieszenia (ze względu na IRI) i opony (ze względu na siłę R , $f_o \approx 11,6$ Hz, $L_{o,V80} \approx 1,9$ m), również są poprawne pod względem dokładności i stabilności uzyskanych rozwiązań układu równań różniczkowych (2a i 2b) w całym badanym przedziale częstotliwości. W prowadzonych obliczeniach, długość kroku B dla poszczególnych częstotliwości funkcji

wymuszającej drgania układu dynamicznego była optymalizowana według procedury kontrolującej w programie RKG dokładność obliczeń.

Walidacja programu RKG do badań modelu pojazdu w ruchu nieustalonym

Rzeczywiste profile nierówności nawierzchni jezdni, jakie otrzymuje się w postaci zbioru rzędnych, są zwykle funkcjami losowymi o charakterze nieciągłym. Stąd wyniki obliczeń uzyskane z rozwiązania układu równań (2a i 2b) będą opisywały zachowanie pojazdu obliczeniowego w ruchu nieustalonym o losowo zmiennych oscylacjach jego elementów.

W celu przeprowadzenia walidacji programu komputerowego RKG pod kątem poprawności obliczeń przyjęto do porównań niezależne zbiory danych numerycznych, jakie zostały opublikowane w pracy dla Banku Światowego (BS) [12] – przykład A, oraz w normie ASTM [4] – przykład B.

Przykład A

Do porównań przyjęto dwa zbiory danych numerycznych. Pierwszy zbiór, tzw. „wzorcowy” przyjęto z pracy [13], którą opublikowali autorzy opracowanej dla BS procedury obliczeniowej. Prezentowany zbiór wskaźników równości na wykresie i w tabeli z rozdzielczością liczb do 5 miejsc po przecinku, pochodzi z symulowanego przejazdu modelu pojazdu samochodowego z $V = 80$ km/h przez nierówność nawierzchni, jako przeszkodę w kształcie trójkąta równoramiennego o podstawie równej 4 m i wysokości 20 mm (podjazd i zjazd o nachyleniu 1%), jaką usytuowano w odległości 1 m od początku ocenianego odcinka drogi o łącznej długości 30 m. Wysokość tej przeszkody jest większa od ugięcia statycznego opony ($u_{stat.}$) o ok. 16 proc. Obliczenia $dIRI$ wykonano dla 120 kroków obliczeniowych o długości 0,25 m. W tym teoretycznym eksperymencie chodzi o to, aby na odcinku początkowym (4 kroki) model pojazdu w stanie statycznej równowagi dojechał po równej nawierzchni do przeszkody, gdzie w trzech punktach załamania niwelety o odciętych: 1,0 m, 3,0 m i 5,0 m dozna następujących po sobie różnoimiennych wstrząsów w postaci impulsów (co 8 kroków), z których pierwszy stanowi dla jego elementów wymuszenie oscylacji a dwa następne ich zaburzenie. Za przeszkodą, na pozostałym odcinku drogi (100 kroków), wskutek opóźnienia fazowego reakcji układu zawieszenia, mają one ulec swobodnemu

wytlumieniu, aż do poziomu zbliżonego do stanu statycznej równowagi.

Drugi zbiór porównywanych danych otrzymano z wykonanych obliczeń programem RKG do tak samo opisanego eksperymentu, przy czym długość ocenianego odcinka wydłużono do 50 m. Uzyskane wyniki pokazano na wykresach $dIRI$ i IRI (rys. 4). Niepewność standardowa w przypadku zbioru wskaźników IRI w zależności od przejechanej odległości dla 120 kroków obliczeniowych wynosi 0,00001 mm/m, a największa różnica równa się 0,00004 mm/m. To jednoznacznie świadczy o bardzo dobrej zgodności uzyskanych wyników obliczeń przeprowadzonych według dwóch niezależnych metod obliczeniowych. Uzyskane wyniki dla wybranych sześciu długości odcinków drogi zestawiono w tabeli 1. Informacyjnie (dodatkowo) zamieszczono tam jeszcze wyniki obliczeń dla dwa razy mniejszego i dwa razy większego kroku obliczeniowego niż podstawowy. Na ogół zaobserwowane w kolumnach różnice między poszczególnymi wynikami nie przekraczają wartości $\pm 0,05$, a to świadczy o tym, iż w tym przykładzie zawierają się one w przedziale zaokrąglenia liczb dla ocen równości.

Przykład B

W normie ASTM [4] przedstawiono inny algorytm programu do wyznaczania wartości IRI , którym wykonano obliczenia dla analogicznie opisanej nierówności nawierzchni, lecz odcinka $L = 15$ m z krokiem $B = 0,15$ m (100 kroków obliczeniowych), gdzie dojazd do trójkątnej przeszkody wynosi 0,6 m, podjazd na wysokość 20 mm oraz zjazd z niej (nachylenie ok.

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń przy przejeździe przez trójkątną nierówność wg opisu z pracy [12]

Metoda obliczeń	Długość kroku obliczeniowego B	Wartość przeciętna IRI [mm/m] przy ustalonej długości ocenianego odcinka drogi (L)						Uwagi
		10 m	15 m	20 m	25 m	30 m	50 m	
Wg [12]	0,250 m	5,08670	3,71304	2,95143	2,41392	2,04955	–	wzorcowy
RKG	0,250 m	5,08672	3,71306	2,95144	2,41393	2,04956	1,2491	
	0,125 m	5,08887	3,72272	2,95740	2,42004	2,05453	1,25231	
	0,500 m	5,14152	3,73296	2,96875	2,42508	2,05907	1,25434	
Wartość średnia IRI wg RKG		5,11	3,72	2,96	2,42	2,05	1,25	
Odchylenie standardowe		0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	
95% błąd średniej IRI		0,09	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń przy przejeździe przez trójkątną nierówność wg opisu z normy [4]

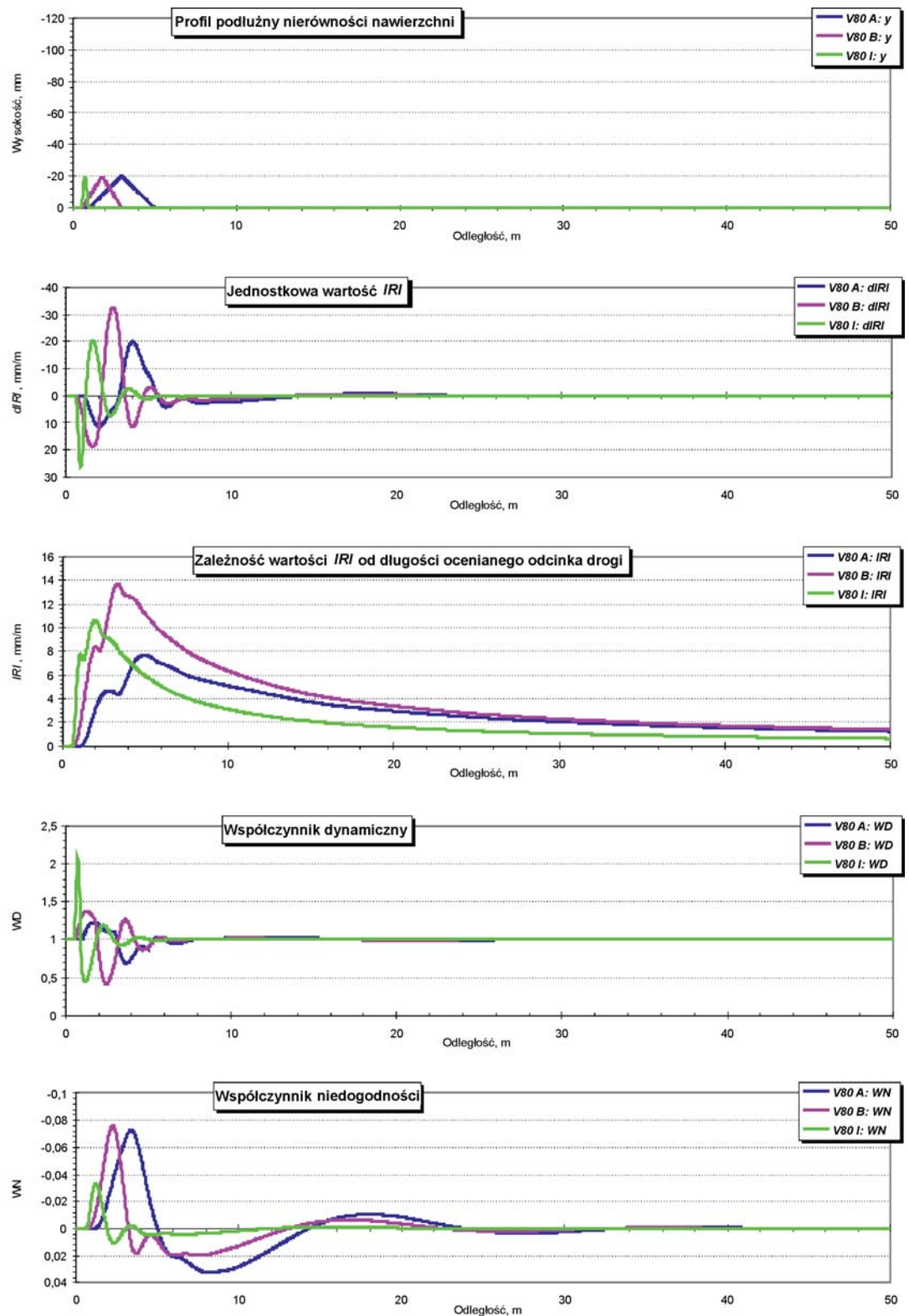
Metoda obliczeń	Długość kroku obliczeniowego B	Wartość przeciętna IRI [mm/m] przy ustalonej długości ocenianego odcinka drogi (L)						Uwagi
		9,9 m	15 m	20,1 m	24,9 m	30 m	49,8 m	
Wg [4]	0,150 m	–	4,36	–	–	–	–	wzorcowy
RKG	0,150 m	6,41568	4,36853	3,36736	2,73848	2,29601	1,39295	
	0,075 m	6,41360	4,36881	3,36775	2,73899	2,29650	1,39330	
	0,300 m	6,36480	4,33159	3,33940	2,71550	2,27678	1,38126	
Wartość średnia IRI wg RKG		6,40	4,36	3,36	2,73	2,29	1,39	
Odchylenie standardowe		0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	
95% błąd średniej IRI		0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	

1,67%) po 1,2 m i przejazd za przeszkodą na odcinku drogi 12 m. Jako kontrolny wynik obliczeń podano jedynie wartość końcową $IRI = 4,36$ mm/m. Odpowiadający wynik obliczeń wykonanych programem RKG wynosi 4,36853 mm/m. Jest on większy średnio o ok. 0,2 proc. i również świadczy o dobrej zgodności obu niezależnych metod obliczeniowych. Uzyskane wyniki obliczeń pokazano na wykresach $dIRI$ i IRI dla wydłużonego odcinka drogi do 50 m. W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń przy wybranych sześciu długościach odcinków drogi, przy czym informacyjnie zamieszczono tam jeszcze wyniki dla dwa razy mniejszego i dwa razy większego kroku obliczeniowego niż podstawowy. Zaobserwowane w kolumnach różnice między poszczególnymi wynikami na ogół nie przekraczają wartości $\pm 0,05$, co świadczy, że zawierają się w błędzie zaokrąglenia liczb dla ocen równości.

Równość pojedynczej nierówności nawierzchni na odcinku drogi

Z porównania zestawionych w tabelach 2 i 3 ocen równości nawierzchni wynika, że trójkątna nierówność z przykładu A wywołuje mniejsze oscylacje układu zawieszenia niż ta o krótszej podstawie z przykładu B, czyli o większej gęstości i wartości impulsów wymuszenia w miejscach załamania niwelety. Przy tym, w obu tych przykładach, parametry opisujące na wydłużonym odcinku drogi do 50 m oscylacje modelu pojazdu obliczeniowego podczas przejazdu przez pojedyn-

czą przeszkodę, są ogólnie podobne do siebie pod względem kształtu wraz z charakterystycznym układem lokalnych zaburzeń, które świadczą o nieciągłości profilu drogi. W celu porównania uzyskanych wyników, pokazano na tych samych pięciu wykresach (rys. 4) przebiegi oscylacji parametrów przy

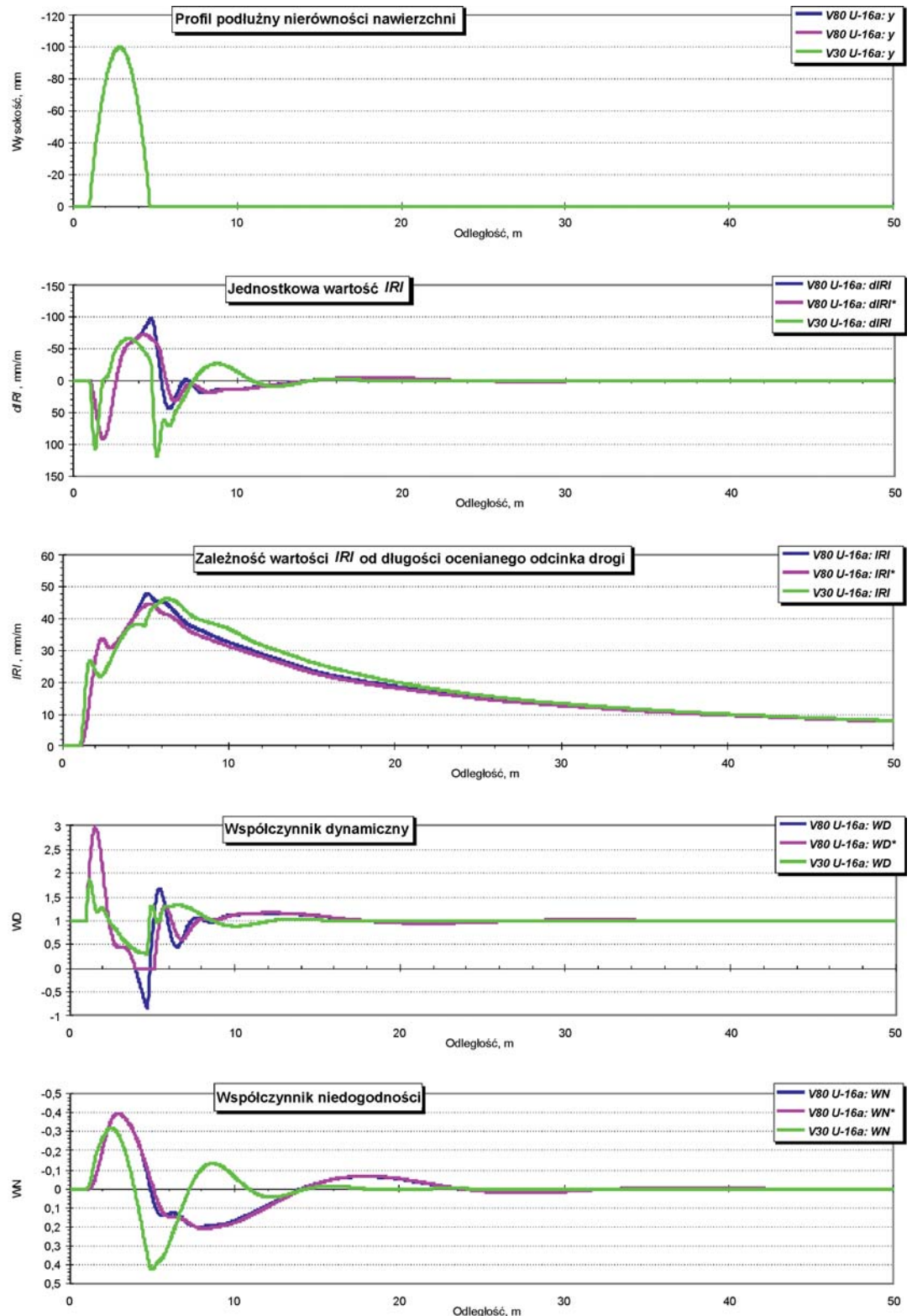


Rys. 4. Zestawienie parametrów opisujących oscylacje wybranych elementów modelu pojazdu obliczeniowego podczas przejazdu z $V = 80$ km/h przez nierówność nawierzchni w kształcie trójkątnej przeszkody o długości podstawy 4 m (przykład A), 2,4 m (przykład B) i 0,5 m (przykład I)

najmniejszej trójkątnej nierówności (impulsu) o podstawie równej 0,5 m (dwa kroki obliczeniowe) i tej samej wysokości, jako przykład I.

Należy zauważyć (rys. 4), że największa jednostkowa wartość $dIRI$ występuje zawsze za wierzchołkiem nierówności, co jest skutkiem wydłużonego czasu swobodnego tłumienia oscylacji układu zawieszenia pojazdu. Stanowi to osobliwą właściwość tej procedury badawczej, iż odcinkom drogi za nierównością są również przypisywane pewne wartości ocen równości nawierzchni. Kierunek przejazdu przez daną nierówność ma zatem wpływ na rozkład jednostkowych ocen równości. Z tego powodu właściwą miarą równości nawierzchni jest ocena odcinkowa, którą wyznacza się po kolei dla sąsiednich odcinków o stałej długości (L), na ogół z przedziału od 10 m do 50 m. Zgodnie z oczekiwaniem, największą przeciętną wartość IRI otrzymano dla pierwszego odcinka drogi o długości 10 m, czyli tam, gdzie ta nierówność się znajduje, a jej wartość maleje w miarę zwiększania jego długości, np. ponad cztery razy przy $L = 50$ m. Z trzech podanych przykładów wynika, że wyznaczona ocena równości w przypadku drogi przejazdu modelu pojazdu odnosi się łącznie do oddzielonych trzema załamaniami niwelety czterech odcinków o równej nawierzchni: dojazdu, podjazdu, zjazdu i odjazdu od nierówności. Z założenia wskaźnik równości jest oceną sekwencyjną i wartość IRI , ze względu na opóźnienie fazowe reakcji układu zawieszenia, zawsze zależy od przyjętego podziału drogi na oceniane odcinki

nawierzchni oraz miejsca lokalizacji na nich nierówności dominującej. Im większa jest długość takiego odcinka, tym mniej informacji uzyskuje się o pojedynczej nierówności nawierzchni jezdni. Dodatkowe niebezpieczeństwo rozmycia takiej informacji może wystąpić wtedy, gdy odpowiadający jej zapis



Rys. 5. Zestawienie parametrów opisujących oscylacje wybranych elementów modelu pojazdu obliczeniowego podczas przejazdu z $v = 80$ km/h i 30 km/h przez próg zwalniający U-16a, jako nierówność nawierzchni w kształcie odcinka kołowego o długości podstawy 3,7 m, wysokości 100 mm i promieniu łuku 17,2 m. Gwiazdka za symbolem parametru oznacza wariant obliczeń z możliwością oderwania koła od nawierzchni

dIRI zostanie rozdzielony na dwie sąsiednie oceny równości, co też zdarza się podczas potokowego przetwarzania danych pomiarowych. Dlatego w szczegółowych badaniach rozpoznawczych miejsc lokalizacji „dużych nierówności” należy zawsze posłużyć się zbiorem jednostkowych ocen równości.

Oscylacje współczynnika dynamicznego towarzyszące przejazdowi koła pojazdu przez trójkątną nierówność nawierzchni dotyczą – znacząco krótkiej – trzykresowej sekwencji: przeciążenie i odciążenie. Większa siła nacisku występuje na podjeździe, a mniejsza na zjeździe z tej nierówności i dalej już szybko powraca do stanu równowagi statycznej.

Oscylacje współczynnika niedogodności towarzyszące przejazdowi koła pojazdu przez trójkątną nierówność nawierzchni dotyczą – stosunkowo długiej – dwukresowej sekwencji: szybkie pierwsze unoszenie (podrzut) oraz dużo wolniejsze opadanie, o wyraźnie malejącej do zera rzędnej prędkości.

Równość odcinka nawierzchni z progim zwalniającym U-16a

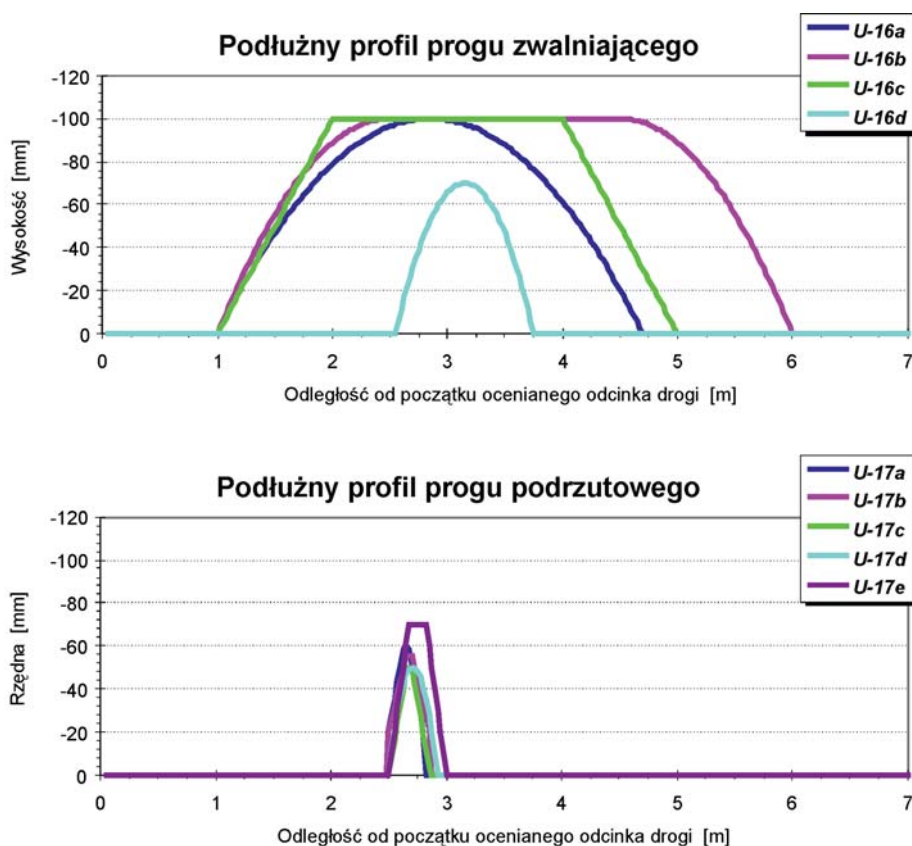
W celu prezentacji oscylacji wybranych parametrów modelu pojazdu obliczeniowego podczas przejazdu przez próg zwalniający U-16a z prędkością graniczną 30 km/h, według danych z rozporządzenia [3], przeprowadzono numeryczne obliczenia i uzyskane wyniki naniesiono na wykresy (rys. 5). Profil nierówności nawierzchni jest w kształcie odcinka kołowego, który charakteryzuje przeszkodę, gdzie są dwie nieciągłości w miejscach załamania niwelety w odległości 3,7 m, które połączono łukiem o promieniu 17,2 m i wysokości cięciwy 100 mm. Dla porównania wykonano obliczenia także przy standardowej prędkości 80 km/h, w pierwszym wariantcie bez możliwości oderwania opony od nawierzchni i w drugim – z możliwością jej oderwania. W tym drugim wariantcie, w celu odróżnienia umownych symboli parametrów dodano gwiazdkę.

Zgodnie z oczekiwaniem, pięć razy większa wysokość pojedynczej nierówności nawierzchni niż była przyjęta w trzech poprzednich przykładach: A, B i I, generuje odpowiednio większe zakresy zmienności wartości czterech parametrów: *dIRI*, *IRI*, *WD* i *WN*. Na ogół przejazd z różnymi prędkościami, choć przy dużych zaburzeniach oscylacji *dIRI*, nie wpływa znacząco na wartość liczbową *IRI* i prawie zupełnie zanika przy $L = 50$ m. W przypadku wskaźnika dynamicznego, przejazdowi z prędkością 80 km/h

na odcinku podjazdu towarzyszy prawie trzykrotne przeciążenie, natomiast podczas zjazdu następuje całkowita utrata kontaktu koła z nawierzchnią. Lokalizację tego odcinka można jednoznacznie odczytać z przebiegu krzywej $WD^* = 0$, po którym następuje ponowne przeciążenie nawierzchni. Wyraźnie mniejsze oscylacje *WD* wokół poziomu statycznej równowagi występują przy prędkości 30 km/h. Przejazd z prędkością standardową przez nierówność, jak widać na wykresie współczynnika niedogodności, bardziej zwiększa dynamikę odczuwania podrzutu i łagodzi opadanie niż przejazd z prędkością graniczną. Moment utraty kontaktu koła z nawierzchnią praktycznie pozostaje poza strefą odczuwalności.

Tabela 3. Zestawienie danych o ukształtowaniu progów zwalniających i podrzutowych według [3], jakie zostały przyjęte do badań równości nawierzchni

Symbol prog	Opis kształtu	Długość podstawy [m]	Wysokość [mm]	Prędkość graniczna V_{gr} [km/h]
U-16a	Odcinek koła, $R = 17,2$ m	3,70	100	30
U-16b	Złożony: trapez z łukowym podjazdem i zjazdem o $R = 17,2$ m	5,00 i 2,00	100	
U-16c	Trapez	4,00 i 2,00	100	
U-16d	Odcinek koła, $R = 4,1$ m	1,20	70	20
U-17a	Złożony: trapez na prostokącie	0,30 i 0,05	40 + 20 = 60	8
U-17b	Złożony: trapez na prostokącie	0,355 i 0,055	35 + 20 = 55	
U-17c	Trapez	0,36 i 0,05	50	
U-17d	Odcinek koła, $R = 4,2$ m	0,42	50	
U-17e	Trapez	0,50 i 0,15	70	



Rys. 6. Kształt, wymiary i lokalizacja na ocenianym odcinku drogi progów zwalniających i podrzutowych

Ocena równości urządzeń do ograniczenia prędkości pojazdów

Zgodnie z rozporządzeniem [3], do wymuszenia fizycznego ograniczenia prędkości pojazdów samochodowych stosuje się progi zwalniające U-16 (od a do d) i progi podrzutowe U-17 (od a do e), które wykonuje się według przykładowo określonych kształtów (tab. 3 i rys. 6). Progi umieszcza się wyłącznie w tych miejscach i na tych odcinkach dróg, na których konieczne jest skuteczne ograniczenie prędkości ruchu pojazdów, jeśli inne metody nie mogą być stosowane lub ich skuteczność jest niewystarczająca.

Zasadnicze różnice między dwoma ustalonymi typami urządzeń do ograniczenia prędkości dotyczą kształtu i wymiarów: długości podstawy, wysokości, kąta nachylenia podjazdu i zjazdu, oraz określonej prędkości granicznej przejeżdżających pojazdów. Oczekiwany efekt ich działania, to spowodowanie podczas przejazdu pojazdu z prędkością większą

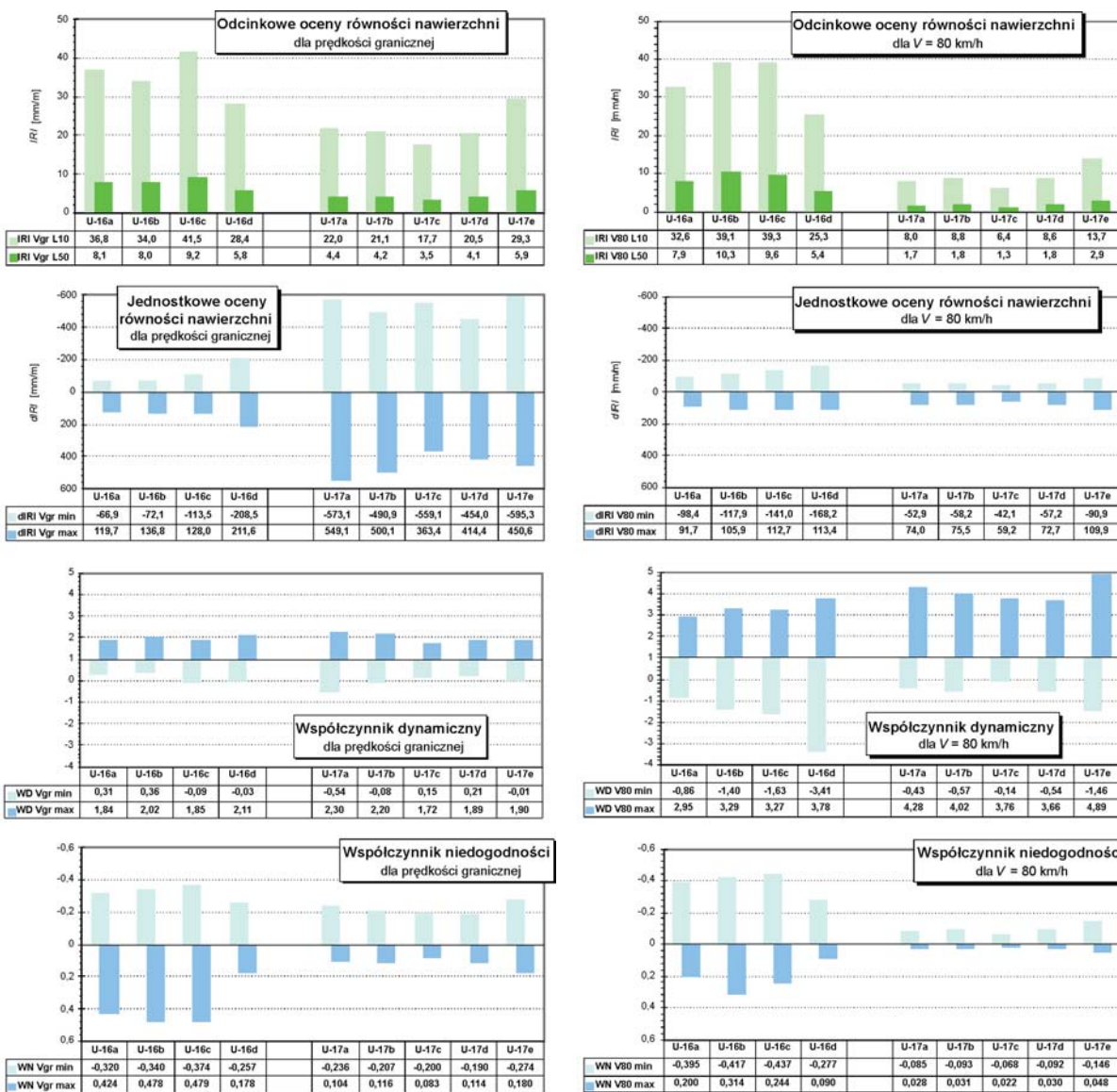
niż prędkość graniczna odczuwalnych wstrząsów, mniejszych przez progi zwalniające i większych przez progi podrzutowe.

W przeprowadzonej analizie porównawczej przyjęto wartości *IRI* do opisu skutków oddziaływań progów na przejeżdżające pojazdy dla ocenianego odcinka drogi o długości 10 m (*L10*), czyli w miejscu ich lokalizacji wraz z dojazdem i odjazdem oraz dla odcinka wydłużonego do 50 m (*L50*). Natomiast do trzech parametrów: *dIRI*, *WD* i *WN*, wyznaczono po dwie wartości ekstremalne (*min*, *max*). Obliczenia wykonano zarówno w przypadku prędkości granicznej (*Vgr*), jaka jest przypisana do danego typu progów (tabela 3), jak i w przypadku prędkości standardowej (*V80*), jaką stosuje się w procedurze obliczeniowej wartości *IRI*, przy czym w wariantach pełnego i niepełnego kontaktu koła z nawierzchnią. Uzyskane wyniki obliczeń zamieszczono w tabelach pod wykresami kolumnowymi (rys. 7).

Stan badanej nawierzchni pod względem równości według skali klasyfikacyjnej (rys. 1) wyrażają jedynie wartości *IRI*, jak

kie zostały wyznaczone do standardowej prędkości modelu pojazdu obliczeniowego na odcinku drogi o długości 50 m.

Z porównania otrzymanych wartości *IRI* dla dwóch typów urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego wynika, że progi zwalniające są mniej równe niż progi podrzutowe. Przy tym zaskakujące jest to, że odcinkowe oceny równości progów podrzutowych według stosowanej skali kwalifikacyjnej są na poziomie stanu dobrego, jaki przewidziano dla nawierzchni dróg o najwyższym standardzie użytkowania. Świadczy to o tym, że pojedyncze deformacje na-



Rys. 7. Zestawienie parametrów charakteryzujących reakcję modelu pojazdu obliczeniowego na przejazd przez progi zwalniające (U-16) i podrzutowe (U-17) z prędkością graniczną i standardową. Wartości *IRI* wyznaczono dla odcinków o długości 10 m i 50 m, natomiast wartości ekstremalne dla *dIRI*, *WD* i *WN*

wierzchni jezdni o profilu zbliżonym do kształtu progów podrzutowych, zarówno wypukłe, jaki i wklęsłe, nie są rozpoznawane jako nierówności drogi.

Z analizy zakresu zmienności jednostkowych ocen równości, które charakteryzują pracę układu zawieszenia w modelu pojazdu w jednym kroku obliczeniowym wynika, że prędkość przejazdu przez próg zwalniający zasadniczo nie wpływa na zmianę reakcji tego układu, inaczej aniżeli przejazd przez próg podrzutowy o istotnie większym kącie nachylenia profilu nierówności. Ponieważ jego gabaryty są względnie małe, to i udział wartości ekstremalnych $dIRI$ w odcinkowej ocenie równości jest niewielki.

Z porównania zakresu zmienności współczynnika dynamicznego, który charakteryzuje siłę nacisku koła na nawierzchnię wynika, że przejazd modelu pojazdu przez każdy z progów z prędkością $V80$ skutkuje całkowitą utratą kontaktu koła z nawierzchnią, o czym świadczą ujemne wartości WD_{min} . W tych przypadkach, gdzie wartość WD_{min} jest bliska zeru można założyć, że została poprawnie określona prędkość graniczna. O wielkości przeciążenia nawierzchni informuje natomiast wartość $WD > 1$. Zgodnie z oczekiwaniem, ponad dwa razy większe wartości WD_{max} otrzymano w przypadku $V80$ niż w przypadku Vgr .

Z analizy zakresu zmienności współczynnika niedogodności, który charakteryzuje odczucia podrzutu i opadania dla jadącego pojazdem wynika, że przejazd przez wyższe i dłuższe progi zwalniające daje gorszą ocenę komfortu niż przejazd przez progi podrzutowe o mniejszej wysokości i krótsze. Ponadto większe wartości WN otrzymano w przypadku Vgr niż w przypadku $V80$, co niejako zaprzecza oczekiwaniu skutecznego wymuszenia fizycznego ograniczenia prędkości pojazdu poprzez wywołanie pionowego wstrząsu nadwozia.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące zastosowania standardowej procedury obliczeniowej wartości IRI do oceny równości nawierzchni jezdni w miejscach występowania na drodze „dużych nierówności”. W związku z tym omówiono założenia dla tej procedury obliczeniowej, przyjęty układ równań ruchu modelu pojazdu obliczeniowego oraz zastosowany algorytm programu komputerowego RKG do ich rozwiązania i sposób jego walidacji. W analizach porównawczych posłużono się *wskaznikiem równości (IRI)* i dwoma współczynnikami – *dynamicznym (WD)* do kontroli kontaktu koła z nawierzchnią i *niedogodności (WN)* do określenia odczucia wstrząsu nadwozia przez jadącego pojazdem. Do badań symulacyjnych przyjęto profile pojedynczych nierówności nawierzchni jezdni o kształtach, jakie zgodnie z rozporządzeniem [3] stosuje się przy wykonywaniu na oznakowanych odcinkach dróg progów zwalniających i podrzutowych. Uzyskane wyniki i wnioski mogą być odniesione także do innych nierówności nawierzchni jezdni, niejako „naturalnie” ukształtowanych, zarówno w postaci wypukłości, jak i zagłębienia, np. w miejscu przełomu. W drogownictwie są obecnie stosowane różne skale kwalifikujące nierówności powierzchni jezdni według wartości IRI w odniesieniu do jakości wykonania nawierzchni nowej (badania odbiorcze), względnie do poziomu zużycia nawierzchni użytkowanej (badania sys-

temowe). Ocena równości „dużej nierówności” w aspekcie bezpieczeństwa ruchu pojazdów dotychczas pozostaje poza zakresem rozpoznania służb drogowych. Jak pokazano na przykładach, to rozwiązanie tego ważnego problemu pod kątem badań prędkości granicznej wymaga opracowania i wdrożenia określonych metod do niestandardowego przetwarzania zbiorów pomiarowych z urządzeń profilometrycznych, jakie są systematycznie gromadzone przez GDDKiA dla potrzeb DSN, [7].

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] *Szczegółowe warunki techniczne dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunki ich umieszczania na drogach*, rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. wraz z załącznikami 1 - 4. (Dz. U. zał. do nr 220, poz. 2181 z dnia 23 grudnia 2003 r.)
- [4] ASTM E1926-08 *Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements*
- [5] ASTM E950-98 (Reapproved 2004) *Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference*
- [6] *System Oceny Stanu Nawierzchni „SOSN”*, wytyczne stosowania, GDDP BSSD, Warszawa, luty 2002
- [7] *Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów*, Wytyczne stosowania, Zarządzenie nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 30 kwietnia 2015 roku.
- [8] Godlewski D. *Równość nawierzchni jako parametr oceny jakości dróg*, Skrypt, WPW, Warszawa 1989
- [9] Godlewski D. *Nawierzchnie drogowe*, Skrypt, WPW, Warszawa 2011
- [10] Godlewski D., Szpinek S. *Diagnostyka nawierzchni jezdni w miejscach zdarzeń drogowych*, „Drogownictwo” 11/2015
- [11] Kaliski S. *i inni, Drgania i fale w ciałach stałych*, PWN, Warszawa 1966
- [12] Sayers M. W., Gillespie T. D., Paterson W. D. O., *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurement*, World Bank Technical Paper Number 46, 1986
- [13] Sayers M.W., Karamihis S.M. *The Little Book of Profiling. Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*, October 1996
- [14] Szpinek S. *Nadzór merytoryczny nad pomiarami równości podłużnej i głębokości koleiny – badania porównawcze urządzeń pomiarowych*, zbiór corocznych raportów dla GDDKiA (dawniej GDDP), Warszawa, 1995 - 2013
- [15] Szpinek S. *(Nie)równość miarą (zu)życia nawierzchni jezdni drogi*, „Drogownictwo” 6/2000
- [16] Szpinek S. *Ocena równości nawierzchni wskaźnikami IRI*, „Drogownictwo” 10/2000
- [17] Szpinek St. *Widmo amplitudowe nierówności podłużnych nawierzchni drogowych*, artykuł recenzowany przez prof. dra hab. inż. Antoniego Szydłę, „Drogownictwo” 9/2001
- [18] Szpinek S. *Wielość ocen i „nierówne” autostrady w Polsce* (artykuł dyskusyjny), „Drogownictwo” 1/2002
- [19] Szpinek S. *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
- [20] Szpinek S. *Niepewność oceny równości nawierzchni drogowej*, „Drogownictwo” 3/2013
- [21] Szpinek S. *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