



STANISŁAW SZPINEK

Polska Inżynieria, Sp. z o.o.  
stanislaw.szpinek@gmail.com

## Niepewność oceny równości nawierzchni drogowej

Międzynarodowy wskaźnik równości, w skrócie oznaczany symbolem *IRI* (*International Roughness Index*) i nazywany wskaźnikiem równości albo wskaźnikiem *IRI*, stanowi w naszym kraju obowiązującą miarę stanu nowych oraz użytkowanych nawierzchni drogowych [18], [19] i [20]. Ogólnie charakteryzuje on kinematyczne oddziaływanie profilu podłużnego nawierzchni jezdni na układ zawieszenia w obliczeniowym modelu pojazdu o dwóch stopniach swobody, jadącego po jej nierównościach ze stałą prędkością ( $V = 80$  km/h), [2]. W ocenie stanu nawierzchni zakłada się, że im bardziej układ zawieszenia pojazdu jest angażowany do tłumienia drgań i wstrząsów, tym jest ona mniej równa. Wartość *IRI* (mm/m albo m/km) równa się prędkości jego wychylenia względem stanu równowagi (mm/s, m/h) podzielonej przez prędkość jazdy modelu pojazdu (m/s, km/h) w ustalonej jednostce czasu (s albo h). Przy tym obowiązują pewne ustalenia, co do sposobu pomiaru profilu nierówności ocenianej nawierzchni, gęstości jego próbkowania, rozdzielczości rejestrowanych rzędnych, charakterystyki dynamicznej parametrów modelu pojazdu, numerycznej procedury rozwiązującej układ dwóch równań różniczkowych zwyczajnych rzędu drugiego, a także rozdzielczości, z jaką ma być prezentowany obliczony wskaźnik równości nawierzchni jako *wynik pomiaru* odcinka drogi o ustalonej długości. Natomiast problem dotyczy określenia wielkości dopuszczalnej rozbieżności między wymaganiami ze specyfikacji a wynikiem pomiaru i jego niepewnością, będącą skutkiem niemożności przejechania urządzeniem pomiarowym powtórnie po tym samym torze i zarejestrowania profilu nierówności nawierzchni w tej samej lokalizacji. Uważa się, że taka rozbieżność nie jest znacząca, gdy zawiera się w niepewności metody pomiarowej.

### Miary niepewności pomiarowej

W realnych warunkach wartość *IRI* jako wynik pomiaru równości nawierzchni jest tylko pewnym przybliżeniem lub estymatą (oszacowaniem) wartości wielkości mierzonej. A zatem ważne jest, by zawsze była podawana niepewność tej estymaty [22]. Zakłada się, że najlepszym oszacowaniem wartości wielkości mierzonej jest *wartość średnia* wyników pomiaru. Zaś pojęcie niepewności odnosi się do wielkości ich rozrzutu w uzasadniony sposób przypisanych do wielkości mierzonej oraz charakteryzujących udział składników stałych i losowych. Niektóre z tych składników można wyznaczyć eksperymentalnie na podstawie rozkładu statystycznego wyników uzyskanych z szeregu pomiarów, a inne na drodze rozważań teoretycznych na podstawie założonych rozkładów prawdopodobieństwa, opartych na doświadcze-

niu lub innych przesłankach. Zwykle miarą wielkości rozrzutu wyników  $x$  jest *odchylenie standardowe* i wtedy mówi się o *niepewności standardowej*  $u(x)$ , ale też o *niepewności rozszerzonej*  $U(x) = k u(x)$ , gdy jego wartość zostanie pomnożona przez współczynnik rozszerzenia ( $k$ ), w celu wyznaczenia oczekiwanego przedziału rozrzutu wyników pomiarów na założonym poziomie ufności, zwykle 95% dla  $k = 2$  albo o *względnej niepewności standardowej*  $v(x)$ , gdy niepewność standardową podzieli się przez wartość estymaty (różnej od zera) i wtedy, jako wielkość bezwymiarowa może być wyrażona w procentach. Im więc mniejsza jest wartość  $u(x)$ ,  $U(x)$ , czy  $v(x)$ , tym większa jest precyzja zastosowanej metody pomiaru, a to oznacza, że zachodzi lepsza zgodność między wynikami uzyskanymi z wielokrotnych pomiarów tej samej wielkości w określonych warunkach. *Złożona niepewność standardowa*  $u_c(X)$  wyraża łączny udział niepewności standardowych, określonych dla wydzielonych składników wielkości mierzonej  $u(x_j)$ , dla  $j > 1$ .

### Niepewność oceny odcinkowej

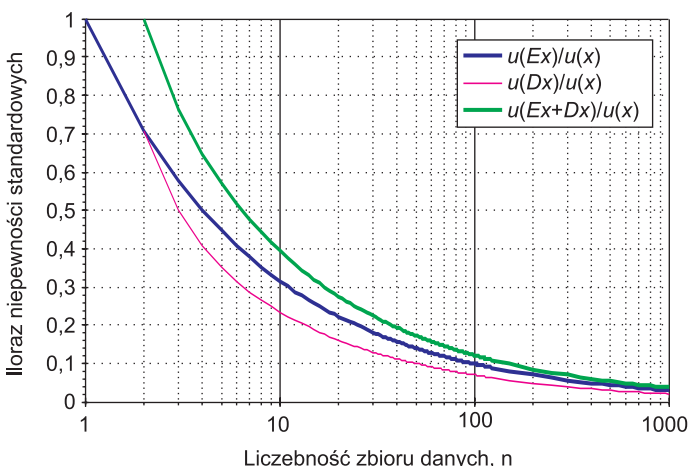
Z analizy zgodności obowiązujących w Polsce dwóch rozporządzeń [18] i [20] w aspekcie badań równości oraz ich omówienia [11], a także wytycznych rekomendowanych do stosowania na terenie RP [21] wynika, że występuje ogólna zgoda co do jednostkowej miary równości, jaką jest wartość *IRI* obliczona w przypadku odcinka nawierzchni o długości 50 m. Natomiast takiej zgody już nie ma w odniesieniu do ocen odcinkowych, które definiuje się na wiele różnych sposobów, nawet w ramach jednego dokumentu. Najczęściej dla zbioru ocen jednostkowych o licznosci  $n$  są obliczane takie parametry statystyczne jak: *wartość średnia* arytmetyczna  $E$  albo *wartość miarodajna*  $E + D$ , gdzie  $D$  jest skorygowanym *odchyleniem standardowym*, bądź też oceny pozycyjne, które wyznacza się dla uporządkowanego niemalejąco zbioru wartości *IRI*, tj. *wartość środkowa* (zakres 50%, *mediana*,  $IRI_{50\%}$ ), *ósmy decyl* (zakres 80%,  $IRI_{80\%}$ ) i *wartość największa* (zakres 100%,  $IRI_{max}$ ). Niekiedy, zamiast metody wyznaczania ocen pozycyjnych, stosuje się równoważną metodę obliczania wielkości trzech frakcji wskaźników równości. Na ogół w specyfikacji technicznej określa się dla ustalonych parametrów, w zależności od klasy drogi i ocenianej warstwy nawierzchni, jedną bądź więcej wartości wymaganych, tworzących pewną skalę oceny jakości wykonania nowej nawierzchni albo oceny stanu zużycia nawierzchni użytkowanej. W analizach porównawczych wartości wielkości mierzonej do wartości wymaganej zgodnie ze specyfikacją należy mieć na uwadze to, że niepewność jednostkowej oceny równości ( $x$ ) propaguje według pewnych reguł na niepewność oceny odcinkowej ( $X$ ), [14]. Na przykład, w tabeli 1 zestawiono wzo-

ry do obliczania zarówno wartości wybranych trzech parametrów:  $E(x)$ ,  $D(x)$  i  $E(x) \pm D(x)$ , jak również odpowiadających im złożonych niepewności standardowych  $u_c(X)$  na podstawie zbioru wartości składowych  $x_i$ , dla  $i = 1, 2, \dots, n$ , których niepewności  $u(x)$  można opisać rozkładem normalnym  $N(0, u(x))$ . W przypadku szacowania niepewności ocen pozytywnych, ze względu na brak rozwiązań analitycznych, stosuje się metody symulacyjne albo przybliżone w odniesieniu do określonego zbioru wyników pomiarów o liczebności  $n$ .

Tabela 1. Zestawienie wzorów parametrów oraz złożonych niepewności standardowych

Parametr statystyczny, X	Wzór	Złożona niepewność standardowa, $u_c(X)$
Wartość średnia arytmetyczna, $E(x)$	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$	$\frac{u(x)}{\sqrt{n}}$
Skorygowane odchylenie standardowe, $D(x)$ dla $n > 1$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - E(x))^2}{n-1}}$	$\frac{u(x)}{\sqrt{2n-2}}$
Wartość miarodajna dla $n > 1$	$E(x) \pm D(x)$	$u(x) \sqrt{\frac{3n-2}{2n(n-1)}}$

Na ogół wymagana liczebność zbiorów danych pomiarowych jest określona w zależności od celu badań w przedmiotowych przepisach. I tak, pojedynczą wartość  $IRI$  ( $n = 1$ ) stosuje się tylko w obliczeniach wysokości potrażeń za wady trwale wg [6], wartość średnią, gdy systemowej ocenie stanu zużycia podlega nawierzchnia drogi publicznej w układzie odcinków jednokilometrowych, z wyłączeniem odcinków zewnętrznych o długości od 0,5 km do 1,5 km ( $10 < n \leq 30$ ), [19], zaś wartość miarodajną, gdy ocenie jakości wykonania podlega nowa nawierzchnia na krótkim odcinku drogi ( $2 \leq n \leq 10$ ), a także, gdy systemowej ocenie stanu zużycia podlega nawierzchnia autostrady płatnej na odcinkach nie większych niż jednokilometrowe ( $2 \leq n \leq 20$ ) [18]. Natomiast górnego ograniczenia długości nie stosuje się w ocenie jako-



Rys. 1. Zależność niepewności parametrów:  $E(x)$ ,  $D(x)$  i  $E(x) \pm D(x)$  od liczebności zbioru wartości  $x$

ści wykonania długiego odcinka nowej nawierzchni drogi publicznej ( $n > 10$ ) [20].

Niepewność oszacowania odcinkowej oceny równości, jak wynika z analizy podanych wzorów (tabela 1), zależy od niepewności zastosowanej metody pomiarowej i maleje wraz ze wzrostem liczebności zbioru wyników pomiaru (rys. 1). Przydatność danej metody pomiarowej do pewnych zastosowań w praktyce określa więc niepewność  $u(x)$ , którą wyznacza się eksperymentalnie, na podstawie specjalnie przeprowadzonych w tym celu badań porównawczych różnych urządzeń pomiarowych z zachowaniem warunków powtarzalności i odtwarzalności.

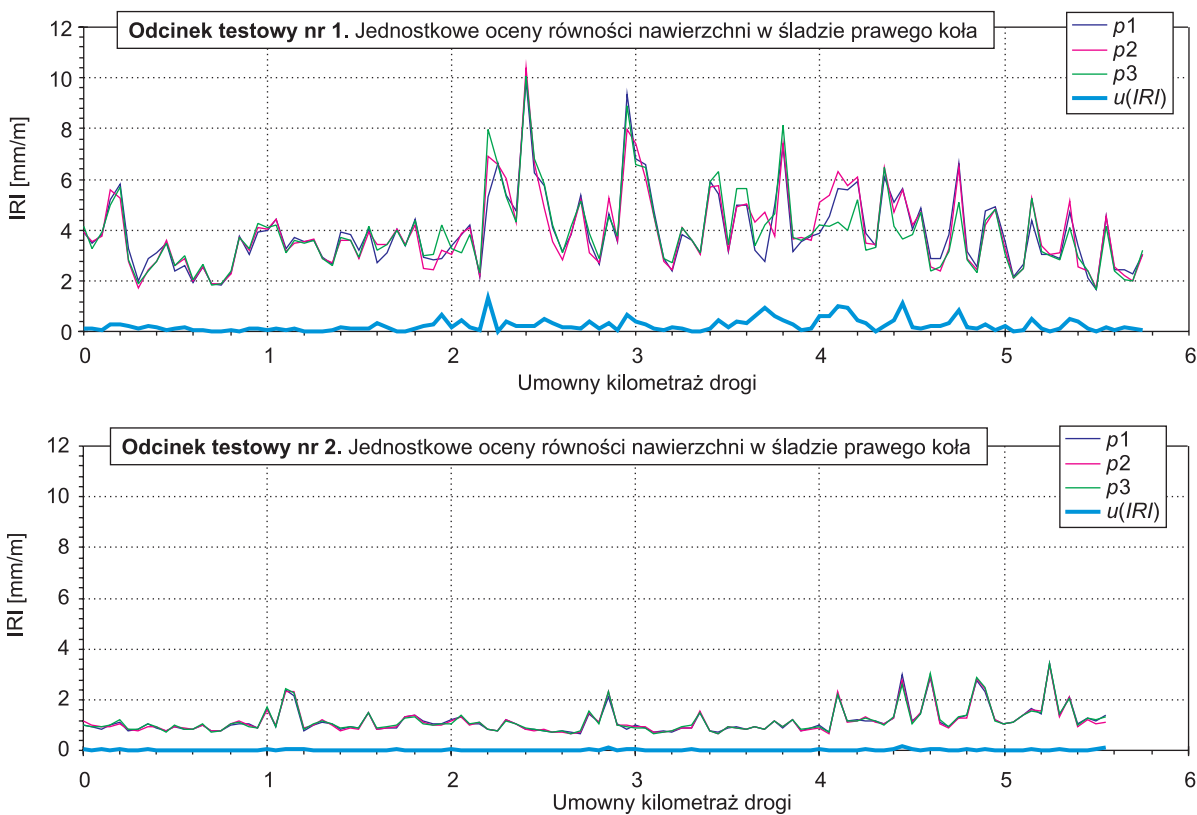
## Precyzja metody pomiarowej

W praktyce wartość  $IRI$  oblicza się numerycznie za pomocą programu komputerowego, który dostarcza producent urządzenia profilometrycznego w pakiecie z innymi programami obsługującymi do pewnych zastosowań ogólnych. Dlatego na potrzeby systemowych badań równości nawierzchni jezdni na sieci dróg krajowych, corocznie podlegających ocenie stanu według ustalonych kryteriów [19], został opracowany pakiet programów MAGDA do przygotowania i potokowego przetwarzania zbiorów pomiarowych. W pierwszej wersji był przeznaczony do użytkowanych w 1996 roku urządzeń mechanicznych [5] i później, w ramach nadzoru merytorycznego adaptowany do urządzeń laserowych, np. [6] i [12], w jakie były wyposażane Wydziały Technologii GDDKiA [4]. W tego typu badaniach chodzi bowiem o szybkie ustalenie właściwej lokalizacji bardzo dużej liczby odcinków pomiarowych, na podstawie zarejestrowanych podczas wykonywanego pomiaru stałych punktów odniesienia, jakimi są: punkty referencyjne, słupki kilometrowe, skrzyżowania, obiekty inżynierskie, dylatacje itp. Zastosowana procedura stałej kontroli precyzji dowiązania zbiorów pomiarowych do układu współrzędnych drogi na etapie ich przygotowania do przetwarzania zapewnia, że wyznaczone oceny równości nawierzchni, niezależnie od urządzenia pomiarowego i wykonawcy, są przypisywane zawsze do tych samych odcinków drogi, co poprzednio. Takie postępowanie pozwala swobodnie korzystać z archiwalnych zbiorów danych, np. w analizach wielkości zmian stanu nawierzchni na dowolnie wybranych odcinkach i modelowaniu procesu degradacji [9] i [13]. Uniwersalność przyjętych opcji sprawia, że ten program jest wykorzystywany także i w innych badaniach, gdzie szczególnie wymaga się zachowania warunków odtwarzalności, np. odbiorczych czy kontrolnych.

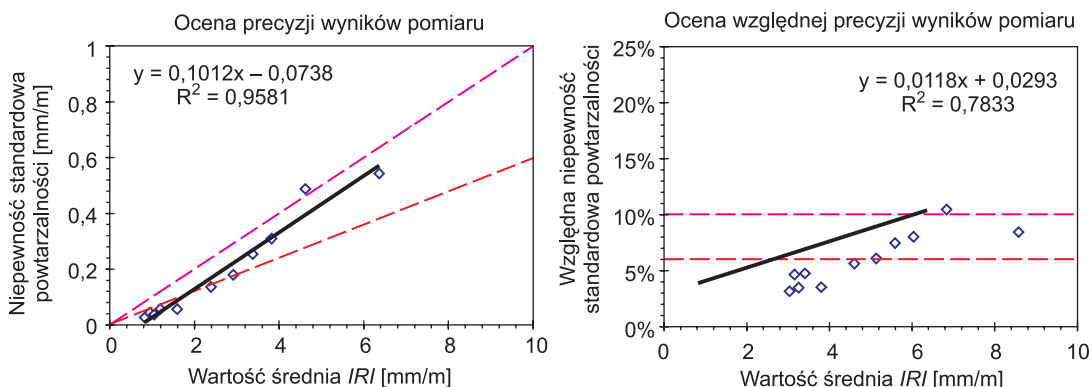
Co roku w okresie wiosennym, jeszcze przed rozpoczęciem sezonu pomiarowego, są organizowane przez GDDKiA badania porównawcze wszystkich urządzeń mierzących na sieci dróg krajowych podłużne profile nierówności nawierzchni jezdni, zarówno jednotorowe urządzenia mechaniczne, jak i najnowszej generacji wielofunkcyjne urządzenia laserowe. Celem badań porównawczych jest sprawdzenie zgodności uzyskanych zbiorów wskaźników  $IRI$ , jako wyników pomiaru równości nawierzchni, z zachowaniem warunków powtarzalności i odtwarzalności, według ustalonych procedur [3] i [7]. Podczas tych badań, każde z urządzeń wykonuje po trzy pomiary profilu nierówności nawierzchni jezdni na zewnętrznym pasie ruchu w prawym śladzie kół na dwóch wybranych od-

cinkach testowych (OT) o różnym poziomie zużycia nawierzchni (powtarzalność). Stan nawierzchni na OT nr 1 o długości 5,8 km ( $n_1 = 116$ ) jest zadowalający (klasa B wg SOSN), a na OT nr 2 o długości 5,6 km ( $n_2 = 112$ ) stan jest dobry (klasa A wg SOSN). W przypadku sprawnych technicznie urządzeń pomiarowych oczekuje się, iż uzyskane zbiory wyników pomiaru równości ( $IRI$ ) będą powtarzalne oraz zgodne w całym przedziale zmienności ich wartości, od około 0,6 mm/m do ponad 10 mm/m, z odpowiednimi zbiorami wyników pomiaru otrzymanymi z pozostałych urządzeń pomiarowych (odtwarzalność). Przy czym określenie *sprawne techniczne urządzenie pomiarowe* obejmuje również wpływ osób go obsługujących, których zadaniem jest wykonanie, z zachowaniem warunków bezpieczeństwa na niewyłączonym z ruchu OT, powtarzalnego pomiaru profilu nierówności nawierzchni (kierowca) i zrejstrowanie wszystkich punktów odniesienia (operator).

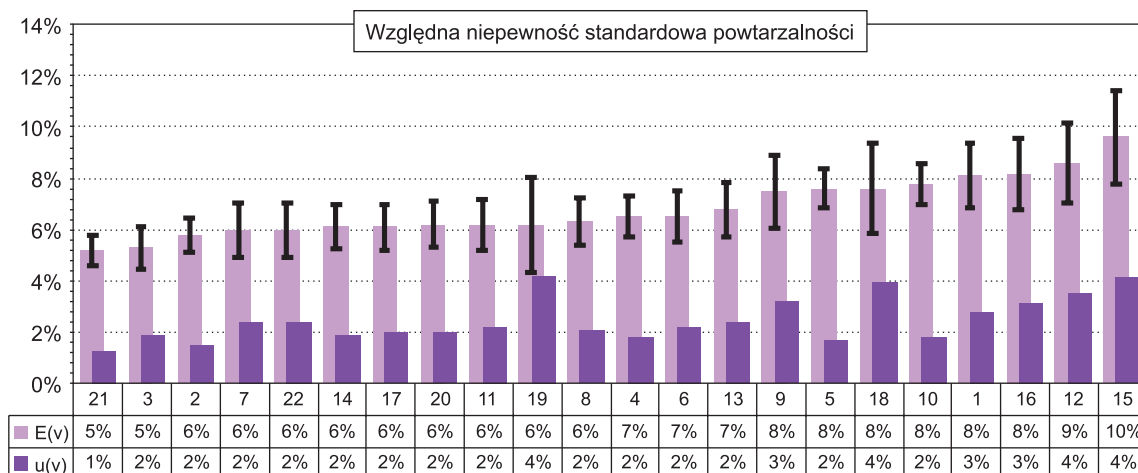
Przykładowe wyniki analizy powtarzalności pokazano na dwóch wykresach (rys. 2), gdzie trzy linie:  $p_1$ ,  $p_2$  i  $p_3$  łączą punkty odpowiadające trzem wartościom  $IRI$ , jakie otrzymano z pomiarów wykonanych jednym urządzeniem w tych samych miejscach nawierzchni. Natomiast linia  $u(IRI)$  łączy punkty odpowiadające wartościom odchyień standardowych powtarzalności, jakie w tych miejscach charakteryzują wielkości rozrzutu trzech wartości  $IRI$  względem wartości średniej. Jak można zauważyć, mniejsza zgodność wyników pomiaru występuje z reguły na mniej równych odcinkach nawierzchni. Na podstawie analizy połączonych zbiorów wyników pomiaru równości z dwóch OT określono zależności między wartościami dwóch niepewności standardowych powtarzalności, bezwzględną  $u(IRI)$  i względną  $v(IRI)$ , a średnimi wartościami  $IRI$ , które pokazano na dwóch wykresach porównawczych (rys. 3). Widoczne tu rozproszenie punktów ma charakter przypadkowy i zawiera się w wyznaczonych



Rys. 2. Graficzne zestawienie wyników pomiaru równości nawierzchni otrzymanych z trzech przejazdów urządzenia ( $p_1$ ,  $p_2$  i  $p_3$ ) i odpowiadających im niepewności standardowych powtarzalności  $u(IRI)$



Rys. 3. Zestawienie bezwzględnych i względnych ocen precyzji wyznaczonych dla jednego urządzenia na podstawie zbioru wyników pomiaru wartości  $IRI$  z dwóch odcinków testowych,  $E(v) = 6,0\% \pm 1,4\%$  i  $u(v) = 2,4\%$ . Liniami przerywanymi zaznaczono granice obszarów odpowiadających bardzo dobrej precyzji  $v < 6\%$ , dopuszczalnej  $6\% \leq v \leq 10\%$  i dyskwalifikującej  $v > 10\%$

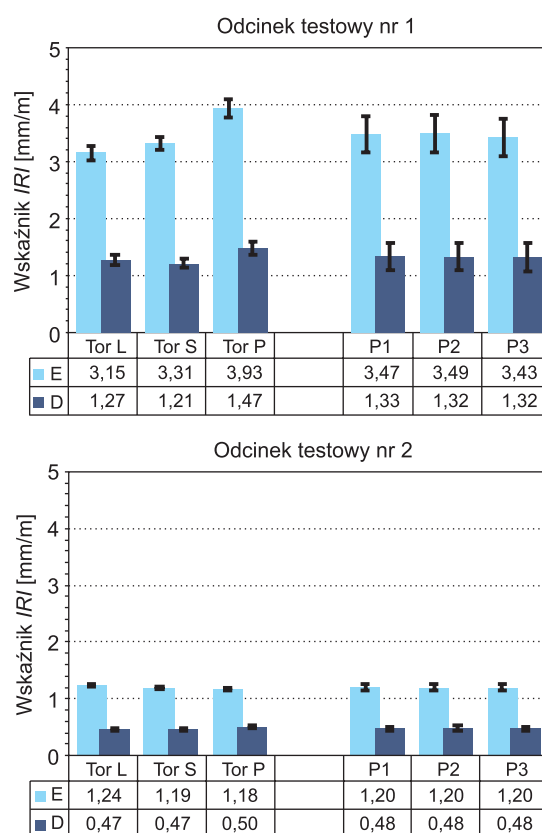


Rys. 4. Zestawienie wyników badań precyzji 22 urządzeń pomiarowych, które uporządkowano niemalejąco według  $E(v)$ . Uśredniona względna niepewność standardowa powtarzalności wynosi 6,8%

ocenach niepewności. Na podstawie analizy takich zależności pochodzących z wieloletnich badań prowadzonych dla różnych urządzeń pomiarowych na tych samych nawierzchniach OT, przyjęto następującą skalę oceny precyzji urządzeń pomiarowych na podstawie średniej względnej niepewności standardowej powtarzalności ( $v$ ). Jeśli  $v > 10\%$ , to dane urządzenie otrzymuje ocenę dyskwalifikującą (negatywną), a jeśli  $v \leq 10\%$ , to ocenę dopuszczającą, przy czym, gdy  $v < 6\%$ , ocenę bardzo dobrą, która świadczy o uzyskaniu najlepszej precyzji pomiaru  $IRI$ . Wyniki  $E(v)$  wraz z niepewnością rozszerzoną ( $k = 2$  i  $n = 20$ ) oraz  $u(v)$ , jakie otrzymano z analizy wyników badań porównawczych 22 urządzeń pomiarowych, uporządkowano niemalejąco według  $v$  i pokazano na wykresie (rys. 4). Z porównania wysokości położenia na tym wykresie przedziałów niepewności rozszerzonej wynika, że tam, gdzie te przedziały są rozłączne, występują znaczące rozbieżności między możliwościami pomiarowymi tych urządzeń.

## Poprzeczny rozkład ocen równości podłużnej

Nawierzchnie użytkowane charakteryzują się niejednorodnym rozkładem ocen równości podłużnej na szerokości jezdni, jak wynika z badań wielotorowych [8], najczęściej zachodzi taka zależność, że im tor pomiarowy jest bliżej krawędzi jezdni, tym wartość  $IRI$  jest większa. Tego typu zróżnicowania ocen równości na ogół nie obserwuje się na nawierzchniach nowych. Aby sprawdzić rozkład poprzeczny ocen równości na nawierzchniach OT, do analizy przyjęto zbiory wyników pomiaru z trzech torów pomiarowych, jakie zarejestrowano jednym urządzeniem na pasie o szerokości około 1,5 m, tj. w lewym i prawym śladzie kół pojazdu pomiarowego (Tor L, Tor P) oraz pośrodku, pomiędzy nimi (Tor S), i powtórzono trzy razy (P1, P2 i P3), (rys. 5). Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że tylko nawierzchnia na OT nr 1 jest nierówna w kierunku poprzecznym, szczególnie w śladzie prawego koła. A więc oscylacje pojazdu pomiarowego wokół określonego toru pomiarowego, których wielkość zależy od umiejętności kierowcy, są głównym źródłem niepewności wskaźników  $IRI$ . I to wyjaśnia istniejący związek między precyzją metody pomiarowej a mierzoną wartością  $IRI$  na OT.

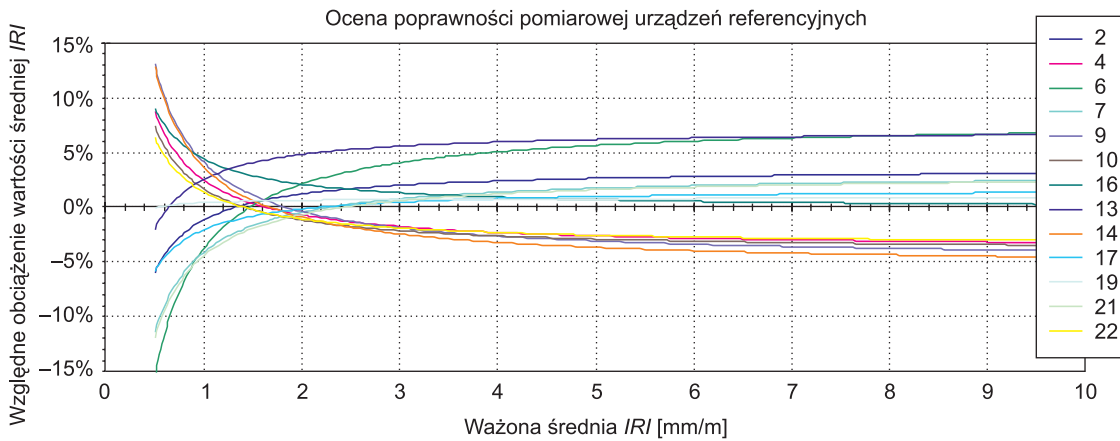


Rys. 5. Zestawienie dla dwóch OT wyznaczonych wartości średnich wskaźników  $IRI$  ( $E$ ) i odchył standardowych ( $D$ ) wraz z 95% przedziałami ufności, jakie obliczono oddzielnie dla każdego z trzech sąsiednich torów jako wartości średnie z trzech przejazdów (Tor L, Tor S i Tor P) oraz dla trzech kolejnych przejazdów jako wartości średnie z trzech torów (P1, P2 i P3)

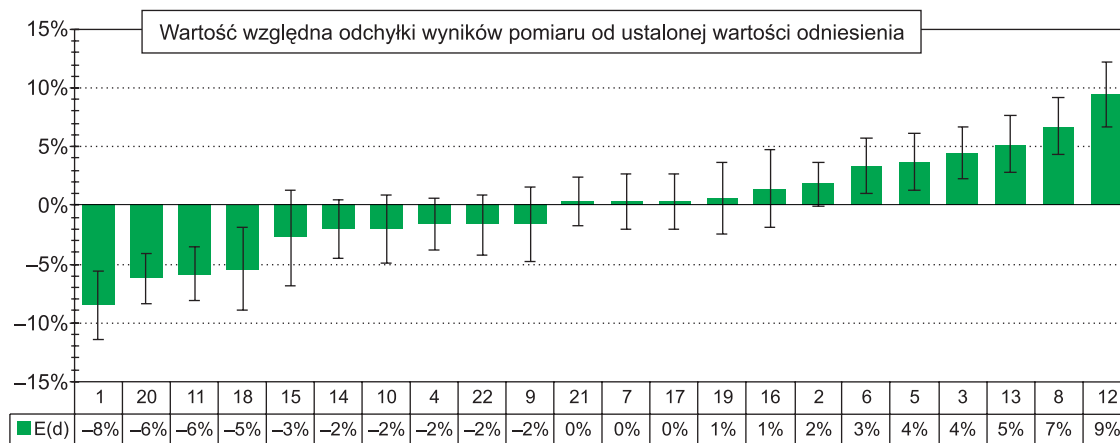
## Obciążenie metody pomiarowej

O obciążeniu metody pomiarowej mówi się wtedy, gdy zachodzi rozbieżność między wartością średnią mierzonej wielkości w warunkach powtarzalności a wartością dokładną (ustaloną wartością odniesienia). Wartość względna tej odchyłki ( $d$ ) jest miarą odtwarzalności odcinkowej oceny równości wyrażającą wielkość jej obciążenia. W analizie wyników





Rys. 6. Zależność względnej odchyłki wyników pomiaru od średniej ważonej IRI, jaką wyznaczono dla 13 urządzeń referencyjnych



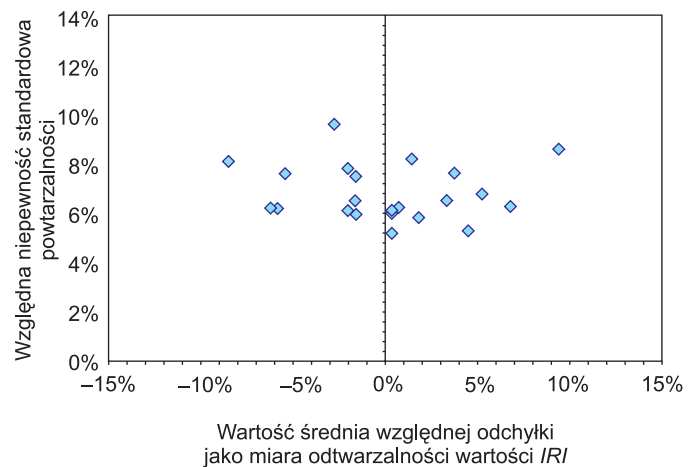
Rys. 7. Zestawienie wyników badań obciążenia 22 urządzeń pomiarowych, które uporządkowano niemalejąco według wartości średniej,  $E(d)$ . Ustalona wartość odniesienia IRI wynosi 2,62 mm/m, a względna niepewność standardowa odtwarzalności  $v(d) = 4,4\%$

pomiarów za ustaloną wartość odniesienia przyjęto wartość średnią ważoną, z wagami  $u(IRI)$ , którą obliczono na podstawie zgodnych w całym badanym zakresie pomiarowym zbiorów danych z wybranych w pierwszym etapie analizy trzynastu urządzeń tzw. referencyjnych (rys. 6). Natomiast na rysunku 7 zestawiono uporządkowane niemalejąco wartości średnie  $d$  22 urządzeń pomiarowych. Wartość względnej odchyłki zawiera składowe oddziaływań czynników systematycznych i przypadkowych, których wielkości na podstawie wyników tych badań nie można oszacować, więc założono, że względna niepewność standardowa odtwarzalności  $v(d)$  dla losowo wybranego urządzenia równa się odchyleniu standardowemu wszystkich wartości względnych odchyłek i wynosi 4,4%.

### Złożona niepewność metody pomiarowej

Precyzja i obciążenie metody pomiarowej są od siebie niezależne (rys. 8). Dana metoda pomiarowa może być mało precyzyjna, gdy uzyskane wyniki pomiaru mają duży rozrzut, ale mimo to nieobciążona, gdy średnia tych wyników odpowiada ustalonej wartości odniesienia. Z kolei, gdy rozrzut wyników jest nieduży, a ich średnia jest oddalona od ustalonej wartości odniesienia, wówczas metoda pomiarowa jest precyzyjna, ale obciążona. Tak więc, złożona względna niepewność standardowa metody pomiarowej jest wypadkową dwóch prostopadłych składowych względnych niepewności standardowych, jednej – powtarzalności (6,8%) oraz drugiej – odtwarzalności (4,4%), i wtedy  $v_c(IRI) = 8,1\%$ . A to w praktyce oznacza, że

standardowa niepewność wskaźnika równości, którą należy uwzględnić w analizach propagacji niepewności oraz w planowaniu badań i ocenie zgodności wyników pomiarów, zależy od mierzonej wartości IRI i jej wartość równa się złożonej niepewności standardowej  $u_c(IRI) \approx 0,08 IRI$ . Dla porównania, w przypadku urządzeń z oceną precyzji dobrą, np.  $v(IRI) \leq 5,0\%$ , to  $v_c(IRI) \leq 7,0\%$ , a z oceną precyzji dyskwalifikującą, to  $v_c(IRI) > 11,0\%$ . Niekiedy dla uproszczenia zapisu, w ogólnych rozważaniach indeks c w oznaczeniu niepewności złożonej wartości IRI może być pomijany.



Rys. 8. Charakterystyka 22 urządzeń pomiarowych pod względem precyzji i obciążenia wyników pomiarów równości nawierzchni

## Zasady zaokrąglania wyniku pomiaru i niepewności

Ogólnie zapis pełnego końcowego wyniku pomiaru z badań równości nawierzchni powinien składać się z dwóch liczb przybliżonych  $X \pm U$ , z których pierwsza wyraża wartość odcinkowej oceny równości  $X$ , a druga określa związaną z nią niepewność rozszerzoną  $U$ . W opracowaniu należy zawsze podać dwa składniki, gdy wartość  $X$  przekracza nieznacznie wymaganą wartość ze specyfikacji  $X_w$  ( $X_w > X \geq X_w + U$ ). Natomiast drugi składnik można pominąć, gdy takiego przekroczenia nie ma albo jest ono znacznie większe niż ustalona *a priori* wartość  $U$ .

W obowiązujących dokumentach wymaganą wartość *IRI* podano jako liczbę mianowaną w mm/m z jedną cyfrą po przecinku. Natomiast wartości *IRI*, które przyjmuje się do obliczeń, są zawsze zapisywane w zbiorach wynikowych jako liczby mianowane w mm/m z dwiema cyframi po przecinku. Wynik obliczeń otrzymuje się zwykle z większą liczbą cyfr po przecinku niż jest określona przez wartość wymaganą, dlatego ważne jest, by przy ich zaokrągleniu stosować powszechnie przyjęte zasady. A mianowicie:

1. Wartości liczbowe wyniku pomiaru równości i niepewności rozszerzonej zaokrągla się do liczby z jedną cyfrą po przecinku, bezpośrednio przed porównaniem ich z wartością wymaganą.
2. Liczbę zaokrągla się w dół, jeśli drugą cyfrą po przecinku jest cyfra z przedziału  $0 \div 4$ , a w górę, jeśli z przedziału  $6 \div 9$ . W przypadku cyfry 5 stosowane są dwie zasady: a) zawsze w górę albo b) w górę, gdy poprzedzająca ją cyfra jest nieparzysta lub w dół, gdy jest ona parzysta. Można stosować dowolną z tych zasad, ale w jednym opracowaniu należy konsekwentnie stosować tylko jedną. Niemniej w ocenie równości zalecaną jest b).
3. Jeżeli na skutek zaokrąglenia wartość liczbową niepewności rozszerzonej zmniejszy się o więcej niż 5%, należy podać wartość zaokrągloną w górę [15].

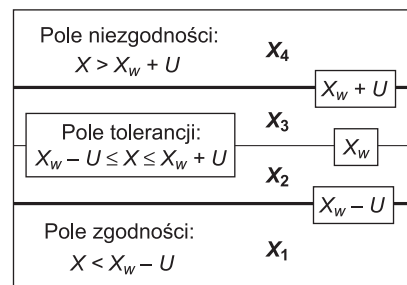
## Stwierdzenie zgodności ze specyfikacją

Równość nawierzchni jest cechą eksploatacyjną, która jest bezpośrednio odczuwana przez użytkowników drogi, im liczbowo większe są wartości *IRI*, tym niższy jest komfort jazdy i mniejsze bezpieczeństwo ruchu. W zależności od założonego standardu drogi, żąda się w wymaganiach jakościowych, aby odcinkowa ocena równości nie przekraczała określonej w specyfikacji wartości wymaganej  $X \leq X_w$  (nierówność nieostra), czyli  $X < X_w$  lub  $X = X_w$ . A to oznacza, że niezgodność ze specyfikacją zachodzi tylko wtedy, gdy  $X > X_w$  (nierówność ostra).

Zgodnie z ogólnymi zasadami teorii niepewności, celem badań zgodności końcowego wyniku pomiaru  $X \pm U$  ze specyfikacją jest wydanie orzeczenia o jego zgodności albo niezgodności z wartością wymaganą  $X_w$ . Ponieważ z przeprowadzonego eksperymentu wynika, że występuje zależność  $u_c(I-RI) \approx 0,08 IRI$ , opisująca związek między precyzją metody pomiarowej a poziomem nierówności ocenianej nawierzchni, to oszacowanie niepewności rozszerzonej wyznacza się w odniesieniu do wartości wymaganej  $X_w$ ,  $U = U(X_w)$ , a nie do

wyniku pomiaru  $X$ . Na rysunku 9 pokazano przyjęty do rozważań umowny podział całego obszaru wyników pomiaru dwiema liniami tolerancji na trzy pola: zgodności, tolerancji (niepewności) i niezgodności, na którym symbolicznie zlokalizowano cztery przypadki możliwych wyników pomiaru:  $X_1, X_2, X_3$  i  $X_4$ .

Rys. 9. Umowny podział całego obszaru wyników pomiarów ( $X$ ) dwiema liniami tolerancji na trzy pola: zgodności, tolerancji i niezgodności, gdzie  $X_w$  – wartość wymagana i  $U$  – rozszerzona niepewność metody pomiarowej oraz wyniki pomiaru:  $X_1, X_2, X_3$  i  $X_4$



Szerokość pola tolerancji odpowiada wymaganiu  $X = X_w$  (równość) i zależy od oszacowania rozszerzonej niepewności  $U$ , która jest miarą precyzji zastosowanej metody pomiarowej. Jeśli wartość liczbową  $U \leq 0,05$ , to wynik pomiaru zaokrągla się według powszechnie przyjętych zasad, a jeśli  $U > 0,05$  i liczbowo  $X > X_w$ , to należy przeprowadzić badanie zgodności ze specyfikacją. W dwóch obowiązujących rozporządzeniach [18] i [20] w sposób pośredni sformułowano wymagania dla precyzji metody pomiarowej, podając wartość błędu rejestracji (pomiaru) urządzeniem profilu podłużnego nierówności nawierzchni, dla którego można obliczyć *IRI*. A zgodnie z regułą propagacji niepewności danych wejściowych jest ona przenoszona na wynik końcowy obliczeń, którym jest wartość *IRI* i nieokreślona niepewność pomiaru profilu nierówności nawierzchni, będąca składową eksperymentalnie określonej niepewności  $u(I-RI)$  dla urządzeń pomiarowych. Z tego wynika, że zgodnie ze specyfikacją obszar zgodności wyników pomiaru jest wyznaczony przez pole tolerancji i pole zgodności.

Ogólnie w badaniach zgodności wyniku pomiaru ze specyfikacją przyjmuje się do sprawdzenia na założonym poziomie ufności zakładającą równość hipotezę zerową  $H_0: X = X_w$  i zakładającą ostrą nierówność hipotezę alternatywną  $H_1: X < X_w$  albo  $X > X_w$ , którą należy przyjąć, gdy  $H_0$  zostanie odrzucona.

Hipotezę  $H_0$  odrzuca się, gdy wynik pomiaru znajduje się w **polu zgodności** (przypadek  $X_1$ ), wtedy w opracowaniu stwierdza się, że jest on zgodny ze specyfikacją, a gdy w **polu niezgodności** (przypadek  $X_4$ ), że nie jest zgodny ze specyfikacją.

Natomiast nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$ , gdy wynik pomiaru znajduje się w **polu tolerancji**:

a) nie ma przekroczenia wartości wymaganej (przypadek  $X_2$ ), wtedy w opracowaniu stwierdza się, że jest on zgodny ze specyfikacją;

b) nie jest znaczące przekroczenie wartości wymaganej (przypadek  $X_3$ ), wtedy w opracowaniu stwierdza się, że w granicach błędów metody pomiarowo-obliczeniowej jest on zgodny ze specyfikacją.

W praktyce, rozszerzoną niepewność metody pomiarowej  $U(X_w)$  należy oszacować, jeśli występuje przypadek  $X_3$ , by sprawdzić, czy dane przekroczenie jest znaczące, oraz przypadek  $X_4$ , by wykazać, że jest ono znaczące.

**Przykład.** W wyniku pomiarów równości nowo wykonanej warstwy ścieralnej na pasie zasadniczym na odcinku drogi krajowej o długości 500 m otrzymano  $n = 10$  wartości  $IRI$ , tabela 2. Zgodnie z wymaganiami odbiorczymi z rozporządzenia dla dróg publicznych klasy A, S i GP, wartość miarodajna wskaźnika równości nie powinna przekroczyć wartości 2,0 mm/m [20].

Tabela 2. Zestawienie wartości  $IRI$ , mm/m

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	E	D	E + D	
0,91	0,58	2,31	1,15	1,21	1,36	1,14	1,06	1,27	2,85	1,384	0,678	2,062	2,1±0,2

Niepewność standardowa wartości miarodajnej (tabela 1) wynosi

$$u(E + D) = 0,08 \cdot 2,0 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 10 - 2}{2 \cdot 10 \cdot (10 - 1)}} = 0,0631 \text{ mm/m}$$

a niepewność rozszerzona dla  $k = 2$  i po zaokrągleniu wyniku końcowego zgodnie z zasadą 3 równa się

$$U(E + D) = 2 \cdot 0,0631 = 0,1262 \approx 0,2 \text{ mm/m}$$

Stwierdzone przekroczenie wymaganej wartości miarodajnej wskaźnika równości zawiera się w przedziale niepewności rozszerzonej. Pod względem równości badany odcinek warstwy ścieralnej w granicach błędu metody pomiarowo-obliczeniowej spełnia wymagania odbiorcze.

W przypadku planowania badań, gdy oczekuje się wyników pomiarów o większej precyzji niż z przejazdu jednokrotnego, niepewność danej metody pomiarowej można zmniejszyć poprzez zwiększenie liczby powtórzeń pomiaru profilu nierówności, a w odniesieniu do nowej nawierzchni można wykorzystać do tego celu dane z pomiaru wielotorowego.

## Podsumowanie i wnioski

Równość nawierzchni jest cechą eksploatacyjną, która jest bezpośrednio odczuwana przez użytkowników drogi. Im bardziej jest ona nierówna, tym niższy jest komfort jazdy i mniejsze bezpieczeństwo ruchu. Obowiązującą miarą równości na nowych i użytkowanych nawierzchniach dróg publicznych oraz autostrad płatnych jest międzynarodowy wskaźnik równości ( $IRI$ ), który charakteryzuje pracę układu zawieszenia w obliczeniowym modelu pojazdu jadącym po nierównościach drogi. Wartość  $IRI$  oblicza się numerycznie według ustalonej procedury za pomocą programu komputerowego na podstawie zarejestrowanego urządzeniem pomiarowym profilu podłużnego nierówności nawierzchni na pasie ruchu pojazdów, zwykle w prawym śladzie kół.

Zasadniczy problem w ocenie stanu nawierzchni dotyczy określenia wielkości dopuszczalnej rozbieżności między wartością wymaganą w specyfikacji a wynikiem pomiaru i jego niepewnością, będącą skutkiem niemożności przejechania urządzeniem pomiarowym powtórnie po tym samym torze i zarejestrowania profilu nierówności nawierzchni w tej samej lokalizacji. Uważa się, że taka rozbieżność nie jest znacząca, gdy zawiera się w niepewności metody pomiarowej. Na podstawie wyników badań porównawczych, przeprowadzonych z zachowaniem warunków powtarzalności i odtwarzalności urządzeń wykorzystywanych przez Wydziały Technologii GDDKiA do pomiarów równości nawierzchni na sieci dróg krajowych, wyznaczono zależność między niepewnością

standardową metody pomiarowej a mierzoną wartością  $IRI$ ,  $u_c(IRI) \approx 0,08 IRI$ . Ta zależność może być stosowana zarówno do planowania określonych badań równości, jak i do prowadzenia według ustalonych zasad badań zgodności wyników pomiaru równości z wartością wymaganą, którą bardzo różnie definiuje się w obowiązujących i rekomendowanych do stosowania w naszym kraju dokumentach: [16], [17], [18], [19], [20] i [21].

## Bibliografia

- [1] J. Arendarski, *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003
- [2] M. W. Sayers, S. M. Karamihhas, *The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*, październik 1996
- [3] St. Szpinek, *Koncepcja kontroli jakości pomiarów równości podłużnej*, raport IBDiM, Warszawa, lipiec 1994
- [4] St. Szpinek, *Nadzór merytoryczny nad pomiarami równości podłużnej i głębokości kolein*, zbiór corocznych raportów dla GDDKiA (dawniej GDDP), DRO-KONSULT, Warszawa, 1995-2012
- [5] St. Szpinek, *Dokumentacja techniczna i instrukcja obsługi pakietu programów MAGDA v.1.1 do wspomaganie przetwarzania wyników pomiarów równości podłużnej nawierzchni*, DRO-KONSULT, Warszawa, luty 1996
- [6] St. Szpinek, *Profilograf laserowy. Ogólne zasady prowadzenia pomiarów i przetwarzania wyników dla potrzeb SOSN i BDD. Wdrożenie urządzenia Profilograf do pomiarów rutynowych w Polsce*, DRO-KONSULT, Warszawa, listopad 1998
- [7] St. Szpinek, *Serwis techniczny trzech zestawów APL do pomiaru równości podłużnej nawierzchni drogowych w roku 1999, etap II, Kontrola powtarzalności i odtwarzalności pomiarów*, raport DRO-KONSULT, Warszawa, sierpień 1999
- [8] St. Szpinek, *Ocena równości podłużnej nawierzchni dróg krajowych pomiarami jedno- i wielotorowymi*, „Drogownictwo” 1/2000
- [9] St. Szpinek, *(Nie)równość miarą (zu)życia nawierzchni jezdni drogi*, „Drogownictwo” 6/2000
- [10] St. Szpinek, *Ocena równości nawierzchni wskaźnikami IRI*, „Drogownictwo” 10/2000
- [11] St. Szpinek, *Wielość ocen i „nierówne” autostrady w Polsce (artykuł dyskusyjny)*, „Drogownictwo” 1/2002
- [12] St. Szpinek, *Instrukcja obsługi pakietu programów MAGDA/DA służącego do przygotowania i przetwarzania dla potrzeb SOSN zbiorów pomiarowych RSP*, DRO-KONSULT, Warszawa, czerwiec 2010
- [13] St. Szpinek, *Statystyczna metoda rozpoznawania odcinków jednorodnych, część I. Założenia teoretyczne, część II. Przykłady zastosowań w badaniach równości nawierzchni*, „Drogownictwo” 10 i 11/2012
- [14] J.R. Taylor, *Wstęp do Analizy błęd pomiarowego*, PWN, Warszawa 1999
- [15] EA-4/02, *Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu*, Główny Urząd Miar, grudzień 1999
- [16] Praca zbiorowa, *Ekspertyza dotycząca rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 16 stycznia 2002 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych (Dz. U. Nr 12, poz. 116 oraz z 2010 r. Nr 65, poz. 409)*, SITK RP, Kraków, lipiec 2010, <http://www.gddkia.gov.pl/pl/a/3432/prace-naukowo-badawcze-po-roku-2009>
- [17] Praca zbiorowa, *Ekspertyza dotycząca warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie*, SITK RP, Kraków, grudzień 2010, <http://www.gddkia.gov.pl/pl/a/3432/prace-naukowo-badawcze-po-roku-2009>
- [18] *Przepisy techniczno-budowlane dotyczące autostrad płatnych*, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 stycznia 2002 roku (Dz. U. Nr 12, poz. 116)
- [19] *System Oceny Stanu Nawierzchni „SOSN”*, Wytyczne stosowania, GDDP BSSD, Warszawa, luty 2002
- [20] *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)
- [21] *WT-2 nawierzchnie asfaltowe 2008. Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych*. Wymagania Techniczne rekomendowane przez Ministra Infrastruktury do stosowania na terenie RP, IBDiM, Warszawa 2008
- [22] *Wyrażanie niepewności pomiaru*, Główny Urząd Miar, 1999 ■