



JUSTYNA STRÓŻYK-WEISS

Politechnika Poznańska  
justyna.strozyk-weiss@put.poznan.pl



ANDRZEJ POŻARYCKI

Politechnika Poznańska  
andrzej.pozarycki@put.poznan.pl



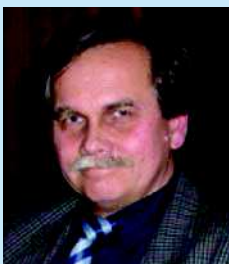
IRENEUSZ WYCZAŁEK

Politechnika Poznańska  
ireneusz.wyczalek@put.poznan.pl



MICHAŁ WYCZAŁEK

Politechnika Poznańska  
michal.wyczalek@put.poznan.pl



RYSZARD ŁUCZAK

Generalna Dyrekcja Dróg  
Krajowych i Autostrad  
rluczak@gddkia.gov.pl

## Charakterystyka statycznych i inercyjnych metod pomiarowych stosowanych do oznaczania równości podłużnej nawierzchni jezdni

Pojęcie równości podłużnej nawierzchni jezdni związane jest z odwzorowaniem rzeczywistego profilu elementów pasa drogowego, a w tym, przede wszystkim nawierzchni jezdni. Wyidealizowany model profilu rzeczywistego nawierzchni (ang. *true profile*), oprócz geometrii niwelety jezdni, zawiera informacje zarówno o teksturze, jak i o nierównościach nawierzchni. W pomiarach in situ, najbardziej naturalnym przybliżeniem profilu jest profil uzyskany przy użyciu statycznego systemu pomiarów wysokościowych i odległości przyrządami geodezyjnymi (taśma miernicza, niwelator i łąta). Metoda statyczna (geodezyjna) pozwala na uzyskanie wysokości bezwzględnych o relatywnie dużym stopniu szczegółowości i z dużą dokładnością. Do zastosowań praktycznych, zmierzających do oznaczenia równości podłużnej nawierzchni, szczegółowość obejmująca wyniki pomiaru cech powierzchni jezdni w skali makrotekstury nie jest konieczna.

W odróżnieniu od statycznych systemów pomiarowych stosuje się również systemy inercyjne montowane w samochodach. W takiej mobilnej konfiguracji systemy te nazywa się profilografami, które w odróżnieniu od ich statycznych odpowiedników zapewniają większą wydajność. W profilografach płaszczyznę odniesienia określa się przy użyciu akcelerometru [6], [8], [10]. Oznaczony profil podłużny nawierzchni składa się z szeregu danych, które odwzorowują wysokość między powierzchnią jezdni względem płaszczyzny odniesienia, a więc wysokość względną.

W minionych latach, w literaturze opublikowano wiele wskaź-

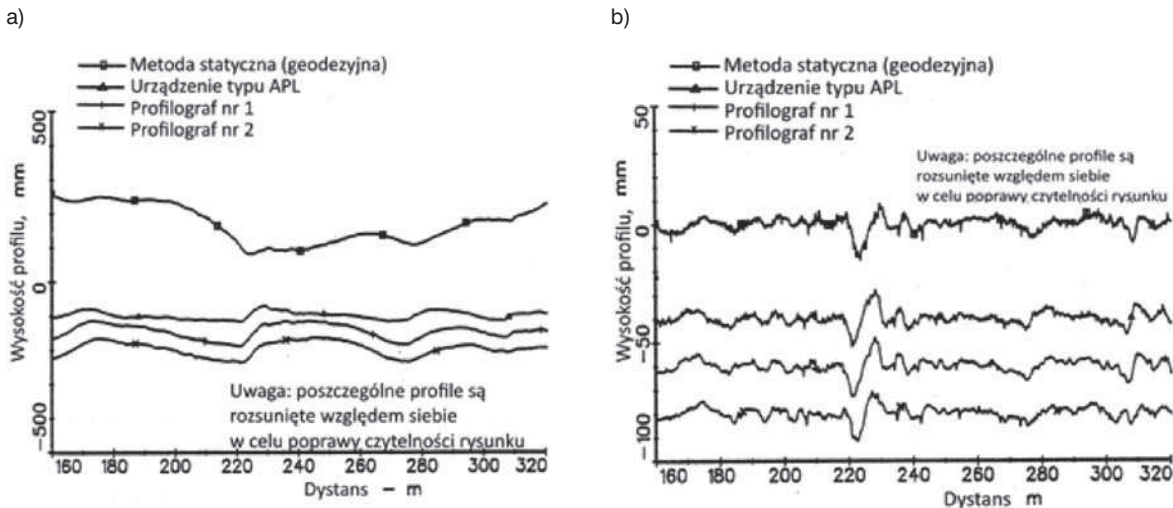
ników, które są próbą skwantyfikowanego opisu równości podłużnej nawierzchni. Szczegółowa analiza większości z nich wskazuje, że ich definicja opiera się na algorytmach matematycznych, zaproponowanych do opisu profili jeszcze w latach 70-tych ubiegłego wieku. Algorytmy te nadal są w użyciu i obejmują dwustopniowy proces przetwarzania wyników pomiaru in situ: 1) przekształcenie, 2) obliczenie indeksu (wskaźnika) równości. Stosując zabieg przekształcenia danych profilu, przekształceniu podlegają tylko wartości odstające. Przed wyznaczeniem indeksu równości, dane zwykle się filtruje (ang. *preprocessing*) w celu poprawy jakości pomiaru poprzez wyeliminowanie niepożądanych „szumów”. Najczęściej stosowanymi zabiegami przekształcenia danych zmierzonego profilu [3] są:

- 1) filtr zbudowany na bazie symulacji drgań wywołanych w modelu ćwiartki lub połowy pojazdu,
- 2) przekształcenie za pomocą średniej ruchomej (filtr dolnoprzepustowy),
- 3) usuwanie średniej ruchomej (filtr górnoprzepustowy).

Profil nawierzchni można również charakteryzować długością fal. Techniki tej analizy obejmują transformatę Fouriera, filtrowanie cyfrowe (filtr dolnoprzepustowy do usuwania szumu lub filtr górnoprzepustowy do usuwania trendu) oraz transformację falkową. Transformata Fouriera zmienia profil z funkcji odległości w funkcję liczby falowej (lub długości falowej). Ten typ przekształcenia nazywa się analizą spektralną. Wynikiem transformaty Fouriera jest funkcja gęstości widmowej mocy (ang. *Power Spectral Density – PSD*) [3].

### Motywacja i zakres

Z uwagi na względny poziom odniesienia, stosowany w systemach inercyjnych, podstawowym przeznaczeniem pomiaru nawierzchni jezdni urządzeniami typu profilograf jest dostarczenie danych do obliczenia wskaźnika równości podłużnej, np. IRI. System inercyjny służy do uzyskania profilu nierówności nawierzchni jezdni z dużą częstotliwością próbkowania sygnału z przetworników drogi. Z rozważań opisanych w [8], [9] wynika, że w procesie porównania urządzeń do pomiaru równości podłużnej nawierzchni jezdni nie należy się kierować bezpośrednim zestawieniem profili nawierzchni jezdni z różnych systemów pomiarowych. Potwierdzają to wyniki badań porównawczych przedstawionych na rysunku nr 1. Zgodnie z opisem zawartym w [8], z profili przedstawionych na rysunku 1a należy odfiltrować fale o relatywnie dużej długości. W opracowaniu [9] autorzy zalecają wykorzystanie np. filtra średniej ruchomej obejmującej odcinek o długości 10 m. Uzyskany efekt tej filtracji przedstawiono na rysunku 1b.



Rys. 1. a) Przykład profili oznaczonych przy wykorzystaniu trzech różnych systemów pomiarowych (metoda statyczna, urządzenie typu APL i profilografy), b) przykład tych samych profili po zastosowaniu filtra średniej ruchomej [8]

Bezpośredni pomiar przy wykorzystaniu dowolnego systemu, jest obarczony wpływem fal o niepożądej długości. Przyjmując założenie, że profile uzyskane przy użyciu profilografów dostępnych na rynku, są poddane już wstępnej filtracji (ang. *preprocessing*), powstaje pytanie o parametry filtrowania wyników pomiaru metodą statyczną. Ilościowej oceny dokonano stosując wzór w postaci (1).

$$\delta = \left| \frac{IRI_{\text{geodezja}} - IRI_{\text{profilograf}}}{IRI_{\text{geodezja}}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

Na podstawie wyników pomiarów in situ, analizie poddano względną różnicę między wartościami IRI, które wyznaczono metodą statyczną ( $IRI_{\text{geodezja}}$ ), a wartościami uzyskanymi przy wykorzystaniu profilografu ( $IRI_{\text{profilograf}}$ ).

## Charakterystyka założeń badawczych

Do wykonania badań porównawczych wybrano odcinek drogi krajowej o długości 1200 m. Badania wykonano na nawierzchni utwardzonego pobocza, na której wykonano szczegółową wizualną inwentaryzację uszkodzeń nawierzchni i urządzeń obcych. W trakcie inwentaryzacji odnotowano między innymi dylatację obiektu mostowego, szwy technologiczne, miejsca wierceń kontrolnych, spękania, ubytki i inne. Szkic zinventaryzowanych uszkodzeń nawierzchni przedstawiono na rysunku 2.

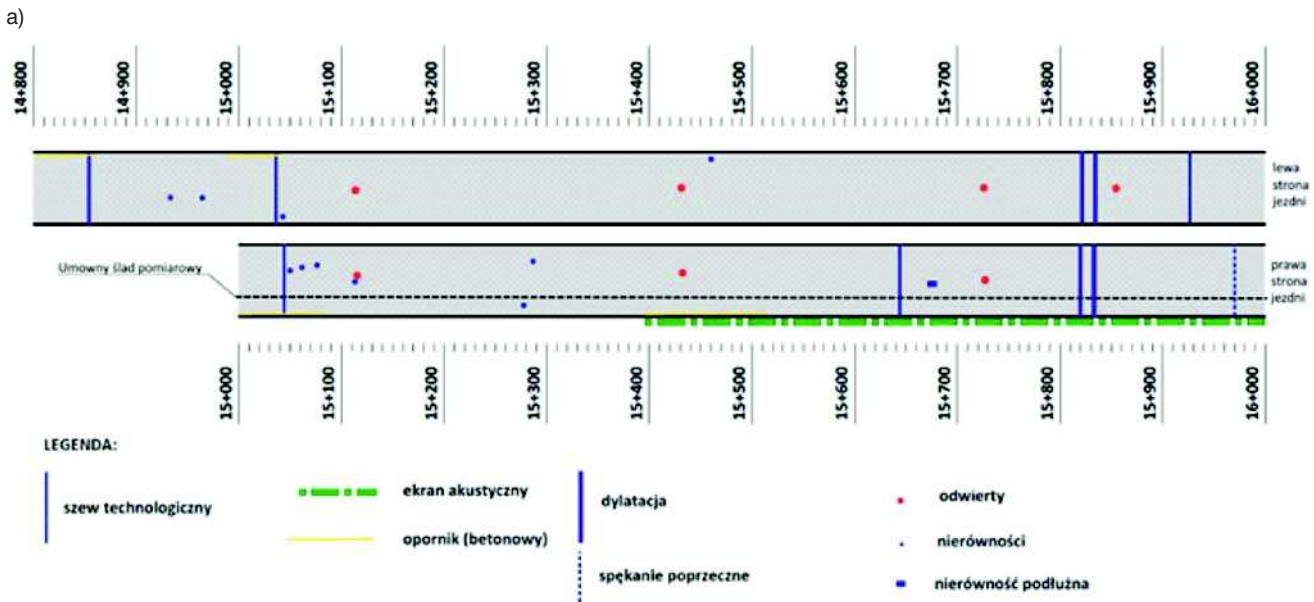
W trakcie analizy makroskopowej zebranego materiału, ocenie poddano między innymi teksturę nawierzchni, co w następstwie doprowadziło do wybrania dwóch odcinków pomiarowych o długości każdego z nich równej 100 m. Lokalizacja odcinków pomiarowych została wyznaczona za pomocą licznika długości drogi zamontowanego w urządzeniu typu profilograf laserowy. Wiązkę lasera profilografu ustawiono w punkcie początkowym umownego śladu pomiaru, w odległości 200 m przed początkiem pierwszego odcinka pomiarowego (fot. 1a). W odległości 200 m od miejsca „start”, profilograf zatrzymano i w odległości 1,60 m od osi linii krawędziowej zaznaczono początek odcinka

pomiarowego numer 1 (fot. 1b). Następnie, w odległości kolejnych 100 m (konsekwentnie według licznika długości drogi w profilografie) zaznaczono koniec odcinka pomiarowego. Analogicznie wyznaczono lokalizację początku i końca drugiego odcinka pomiarowego. W celu szczegółowej lokalizacji odcinków pomiarowych, w plikach z wynikami badań nawierzchni pobocza, w osi umownego śladu pomiarowego zamontowano cztery znaczniki, wykonane z blachy o wymiarach: długość 30 cm, szerokość 10 cm i grubość 1 cm. Oś znaczników usytuowano w odległości 1,60 m od linii krawędziowej (fot. 1c).

Do badań porównawczych wykorzystano typowy, dostępny na rynku w Polsce profilograf typu RSP. Badania równości nawierzchni profilografem wykonano przy stałej prędkości równej 50 km/h. W umownym śladzie pomiaru wykonano cztery niezależne przejazdy urządzeniem, a do analizy wzięto pod uwagę wyniki pomiarów z uwzględnieniem znaczników z blachy, co zostało wyjaśnione w następnym punkcie.

Pomiary geodezyjne wykonano na tych samych odcinkach pomiarowych co pomiar profilografem, również w umownym śladzie pomiarowym. Oś pomiaru zlokalizowano konsekwentnie w odległości 1,60 m od linii krawędziowej ciągłej szerokiej (P-7b). Punkty pomiarowe zlokalizowano zarówno po lewej i prawej stronie osi umownego śladu pomiarowego, jak i w samej osi, w odstępach co 10 cm. Schemat lokalizacji punktów pomiarowych zamieszczono na rysunku 3.

Pomiary geodezyjne wykonano zgodnie z [2]. Do pomiarów wykorzystano niwelator cyfrowy Leica DNA03 i łatę inwarową oraz – niezależnie – tachimetr zmotoryzowany Trimble S3 2” z precyzyjnym przyzmatem 360°. Dla niwelatora cyfrowego Leica DNA 03 dokładność pomiaru wysokości na 1 km przy niwelacji podwójnej na łatę inwarową wynosi 0,3 mm. Zasięg pomiaru elektronicznego zawiera się w przedziale od 1,8 m do 60 m. Poziomowanie osi celowej lunety od ustalenia poziomego odbywa się za pomocą kompensatora wahadłowego z tłumieniem magnetycznym. Zakres wychylenia wynosi  $\pm 10'$ , dokładność kompensatora wynosi 0,3". Tachimetr Trimble S3 służy do pomiaru kątów poziomych, pionowych oraz odległości. Pomiar śledzący na precyzyjny



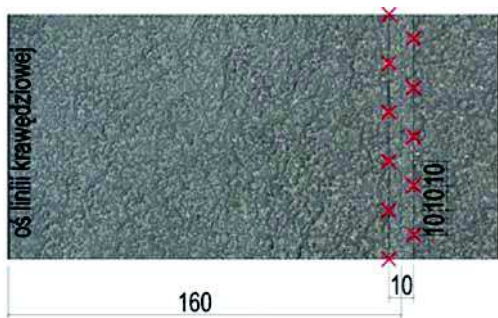
Rys. 2. Ilustracja: a) widok ogólny powierzchni pobocza na rozważanych odcinkach, b) dylatacja obiektu mostowego, c) ubytek w nawierzchni, d) nierówność podłużna w postaci „odcisku” opony samochodowej



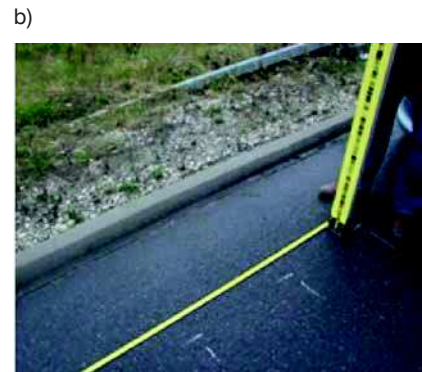
Fot. 1. Ilustracja: a) początek odcinka „rozpędu” urządzeń pomiarowych do stałej prędkości równej 50 km/h, b) początek odcinka pomiarowego, c) lokalizacja znacznika z blachy

pryzmat 360 stopni wykonuje się z dokładnością pomiaru odległości 2 mm + 2 ppm oraz kąta 2 sekundy ( $6''$ ). W urządzeniu zastosowano automatyczny kompensator centralny, dwuosiowy o dokładności 0,5 sekundy/1.<sup>cc</sup> i zasięgu 5' ( $\pm 10^\circ$ ). Zasięg pomiaru w dobrych warunkach pogodowych wynosi od 1,5 m do 2.500 m. Źródło światła stanowi dioda laserowa 660 nm z laserem klasy 1 dla pryzmatu. Na fotografii

nr 2 pokazano zastosowany sprzęt w trakcie wykonywania pomiaru. Pomiar tachymetryczny omawianych profili wykonano w dwóch wersjach: a) celując na pryzmat zainstalowany klasycznie na drążku, b) na pryzmat umieszczony na wózku pomiarowym [14]. Do sporządzenia profilu i dalszych analiz opisanych w artykule wzięto pod uwagę podstawowy pomiar wykonany w osi umownego śladu pomiarowego.



Rys. 3. Schemat lokalizacji punktów pomiarowych (wymiary w centymetrach)

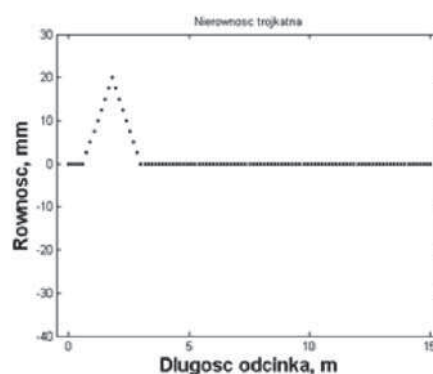


Fot. 2. Sprzęt do niwelacji precyzyjnej a) niwelator cyfrowy Leica DNA03 oraz tachimetr zmotoryzowany Trimble S3, b) stopka łaty inwarowej na punkcie pomiarowym

Obie porównywane metody stosuje się do dyskretyzacji rzeczywistego profilu podłużnego nawierzchni. Metodę statyczną wykorzystano do uzyskania rzędnych profilu metodą próbkowania w odstępach co 10 cm. Urządzenie inercyjne pozwala na uzyskanie rzędnych profilu z większą częstotliwością, a na potrzeby prezentowanych analiz wykorzystano zbiór rzędnych o założonej częstotliwości próbkowania sygnału pomiarowego na odcinku o długości równej również 10 cm.

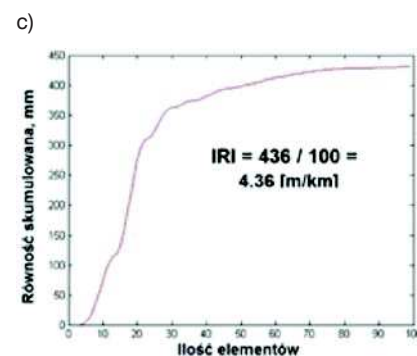
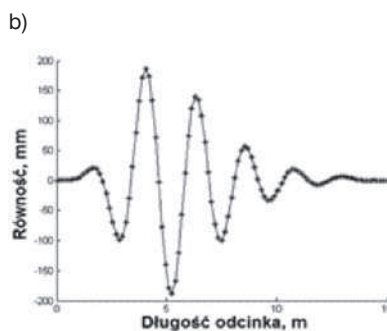
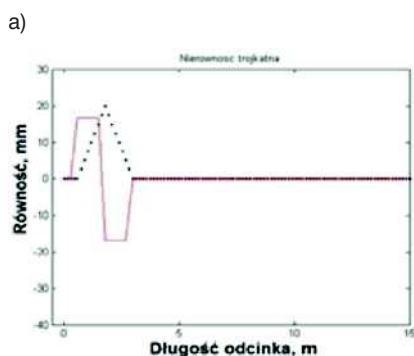
## Mniej znane właściwości wskaźnika IRI

Geneza wielkości IRI jest bardzo szczegółowo opisana w literaturze [4], [10], [11], [12], [13], dlatego w artykule ograniczono się wyłącznie do elementów, które w literaturze są pomijane. Algorytm obliczania wskaźnika IRI zawarty został w normie ASTM E-1926 [1]. Profil nawierzchni jezdni opisuje się zbiorem wartości sąsiadujących ze sobą rzędnych (przy wykorzystaniu urządzeń inercyjnych są to wartości względne, a w przypadku metody statycznej wartości bezwzględne), oznaczonych wzdłuż umownego śladu kół samochodu. Koncepcję obliczania wskaźnika IRI łatwo jest zobrazować na przykładzie kształtu testowego impulsu, który wykorzystuje się do kontroli algorytmu obliczeniowego wskaźnika IRI. W normie impuls testowy algorytmu ma kształt trójkątnej fali przedstawionej na rysunku 4.



Rys. 4. Kształt trójkątnej fali do testowania algorytmów obliczania IRI wg [1]

Dla fali testowej, rzędne profilu podłużnego są rozmieszczone względem siebie w odległości 0,15 m. Profil tworzy łącznie 100 punktów, co w następstwie określa odcinek o długości 15 m. W pierwszym kroku analizy, realizuje się etap przekształcania danych. Do tego celu wykorzystuje się filtr średniej ruchomej (krzywa oznaczona czerwonym kolorem na rysunku 5a). W dalszej kolejności wprowadza się do wyników badań równości, tzw. filtr ćwiartki samochodu (ang. *Quarter-car Filter*), krzywa oznaczona kolorem czarnym na rysunku 5b.



Rys. 5. Główne etapy realizacji algorytmu obliczania wskaźnika IRI dla impulsu w kształcie trójkątnej fali a) efekt wykorzystania filtra średniej ruchomej, b) wpływ filtra z parametrami modelu „golden car”, c) krzywa kumulacji wszystkich 100 wartości oznaczonych na rysunku „b” symbolami gwiazdek

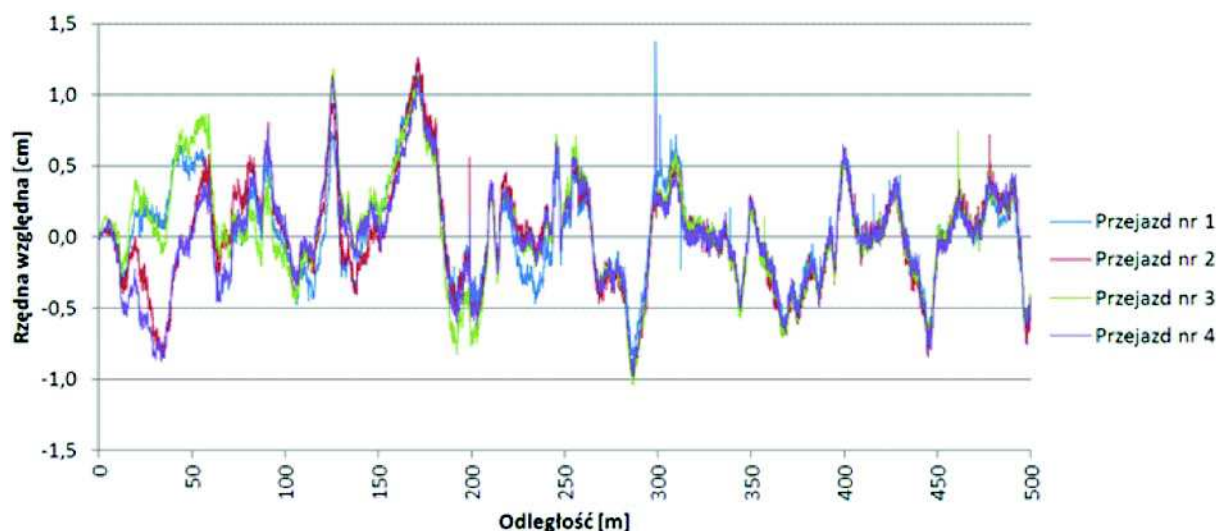
Definicja wskaźnika IRI, sprowadza procedurę działania algorytmu do roli filtra redukującego wpływ wszystkich fal o długości z poza zakresu od 1,3 do 30 m w profilu nawierzchni jezdni [9]. Obliczanie wskaźnika IRI ma charakter iteracyjny, gdzie w poszczególnych iteracjach wyznacza się wartości czterech zmiennych, które są funkcją rejestrowanego profilu. Te cztery zmienne są parametrami symulacji dynamicznej reakcji modelu pojazdu porównawczego (ang. *Golden Car*), który w sposób modelowy przedstawia ruch pojazdu po nawierzchni jezdni o danym profilu [8]. Równania ruchu tego pojazdu (dla stałej prędkości równej 80 km/h), rozwiązuje się ze względu na wspomniane zmienne dla każdego punktu pomiarowego, w którym określone są wartości rzędnej (za wyjątkiem pierwszego punktu pomiarowego). W ostatnim etapie obliczeń, za wartość IRI uznaje się wartość uzyskaną jako iloraz skumulowanych wartości pokazanych na rysunku 7b (w postaci symboli oznaczonych czarnym kolorem), i ich ilości. W analizowanym przykładzie z obliczeń otrzymano wartość równą 4,36 m/km (rysunek 5c), co odpo-

wiada wartości wskaźnika IRI podanej w normie ASTM [1], dla profilu w kształcie wykorzystanej fali trójkątnej.

## Wyniki badań równości podłużnej nawierzchni pobocza

O ile lokalizacja wyników oznaczenia profilu metodą statyczną jest jednoznaczna, to lokalizacja pomiaru przy wykorzystaniu urządzenia typu profilograf musi podlegać szczególnej analizie. Na rysunku 6 podano rzędne względne uzyskane z analizy wyników pomiaru z czterech przejazdów profilografem laserowym RSP wykorzystanym w badaniach.

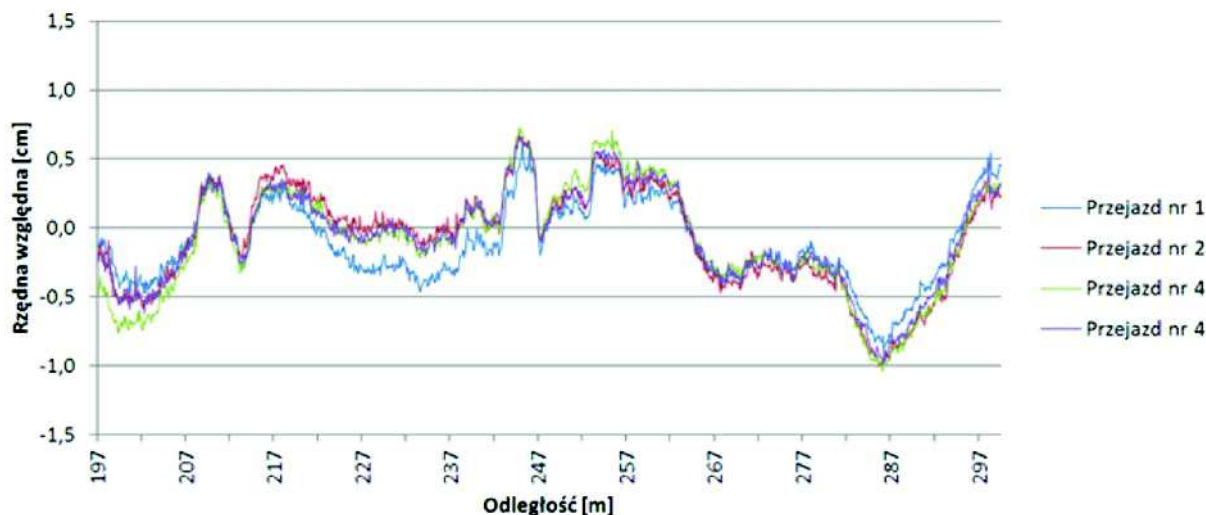
Na podstawie analizy statystycznej wyników oznaczenia pokazanych na rysunku 8 potwierdza się powszechnie znany pogląd, że na początku odcinka zaburzenia mierzonych wartości względnych rzędnych są istotne. Do oceny równości podłużnej nawierzchni przy wykorzystaniu urządzeń inercyjnych bierze się zwykle pod uwagę wyniki z pomiarów



Rys. 6. Profile nawierzchni pobocza uzyskane na podstawie czterech przejazdów profilografem na odcinku o długości 500 m



Rys. 7a. Profile nawierzchni pobocza na odcinku o długości 100 m z widocznymi zaburzeniami wartości względnych rzędnych wynikających z obecności znaczników z blachy



Rys. 7b. Profile nawierzchni pobocza na odcinku o długości 100 m po usunięciu zaburzeń

przy stałej prędkości. Wg instrukcji [5] pojazd musi uzyskać wymaganą prędkość co najmniej 100 m przed rozpoczęciem badania. W niniejszym artykule przyjęto, że w analizie wyników badań pomija się wyniki uzyskane w przypadku pierwszych 200 m.

W celu lokalizacji poszczególnych odcinków pomiarowych wykorzystano celowe zaburzenie wyników oznaczenia profilu, wynikające z zamontowanych w umownym śladzie znaczników z blachy (fot. 1c). Zaburzone obecnością znacznika wartości względnych rzędnych uzyskane przy wykorzystaniu profilografu laserowego zastąpione zostały średnią wartością z dwóch pomiarów: jeden zlokalizowany 10 cm przed i drugi 10 cm za znacznikiem. Efekt zabiegu dla odcinka pomiarowego o długości 100 m pokazano na rysunku 7.

## Bezpośrednie porównanie profili uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi

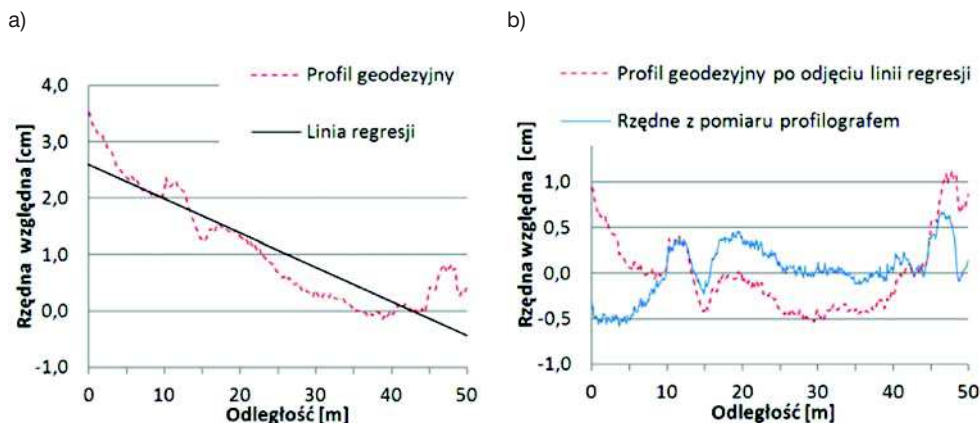
Bezpośrednie porównanie profili z różnych systemów pomiarowych jest prawdopodobnie najbardziej intuicyjnym sposobem oceny danego systemu pod kątem oznaczenia

profilu nawierzchni. Jednak takie podejście nie zawsze jest wyczerpujące, co zostało wyjaśnione już we wprowadzeniu. Do dalszej analizy z całości badanego odcinka wyróżniono cztery odcinki pomiarowe o długości 50 m każdy.

Jedną z metod graficznego dostosowania profili uzyskanych z pomiarów różnymi metodami jest wyeliminowanie z wyników pomiarów uzyskanych metodą statyczną pochylenia podłużnego niwelety jezdni. Wyznaczone pochylenie podłużne odcinków pomiarowych na pierwszym odcinku wynosi 0,06%, na drugim 0,12%, natomiast na trzecim i czwartym wynosi odpowiednio 0,81% i 0,37%. Na rysunku 8 przedstawiono wyniki oznaczenia profili nawierzchni uzyskanych z pomiarów metodą statyczną i profilografem laserowym dla pierwszego odcinka pomiarowego.

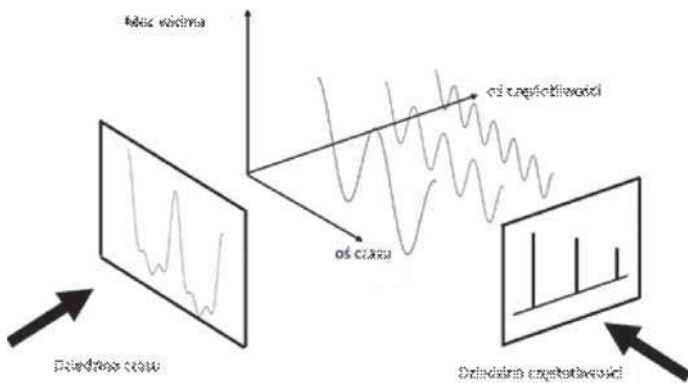
Zagadnienie bezpośredniego porównania oznaczonych profili nawierzchni, można rozważyć poprzez zastosowanie metod charakterystycznych w przypadku procesów stochastycznych. Należy tu jednak zauważyć, że profil nie jest procesem stochastycznym (w krótkim okresie czasu i w przestrzeni jest stały). To oznacza, że jest to proces deterministyczny, który ma jednak cechy sygnału losowego, dlatego metody statystyczne powszechnie stosowane do opisu procesów stochastycznych są również przydatne do analizy profilu nawierzchni. Zgodnie z opisem zawartym w [7], profil nawierzchni można przedstawić jako sumę fal sinusoidalnych, czyli skorzystać z właściwości transformaty Fouriera (rysunek 9).

Jeśli transformata jest stosowana do pokazania rozkładu wariancji profilu, rezultatem jest wykres gęstości widmowej mocy. Odchylenia rzędnych mogą być zatem analizowane przy użyciu kombinacji fal o różnych częstotliwościach, amplitudach i długościach [3]. Na wykresach przedstawiono PSD jako spektrum wid-



Rys. 8. Przykład profili nawierzchni pobocza uzyskanych z pomiarów a) metodą statyczną, b) metodą statyczną po skorygowaniu profilu geodezyjnego o wartości modelu regresji i profilografem laserowym (przejazd nr 2)

mowe elementarnych pochyień niwelety, w celu uwypuklenia potencjalnych zmian profilu (często jest mowa o większej wrażliwości profilu, przez co analiza może być bardziej skuteczna pod kątem wychwycenia jego wad). Wyniki transformacji profilu pokazano w zakresie 12 pasm na oktawę (rysunek 10).



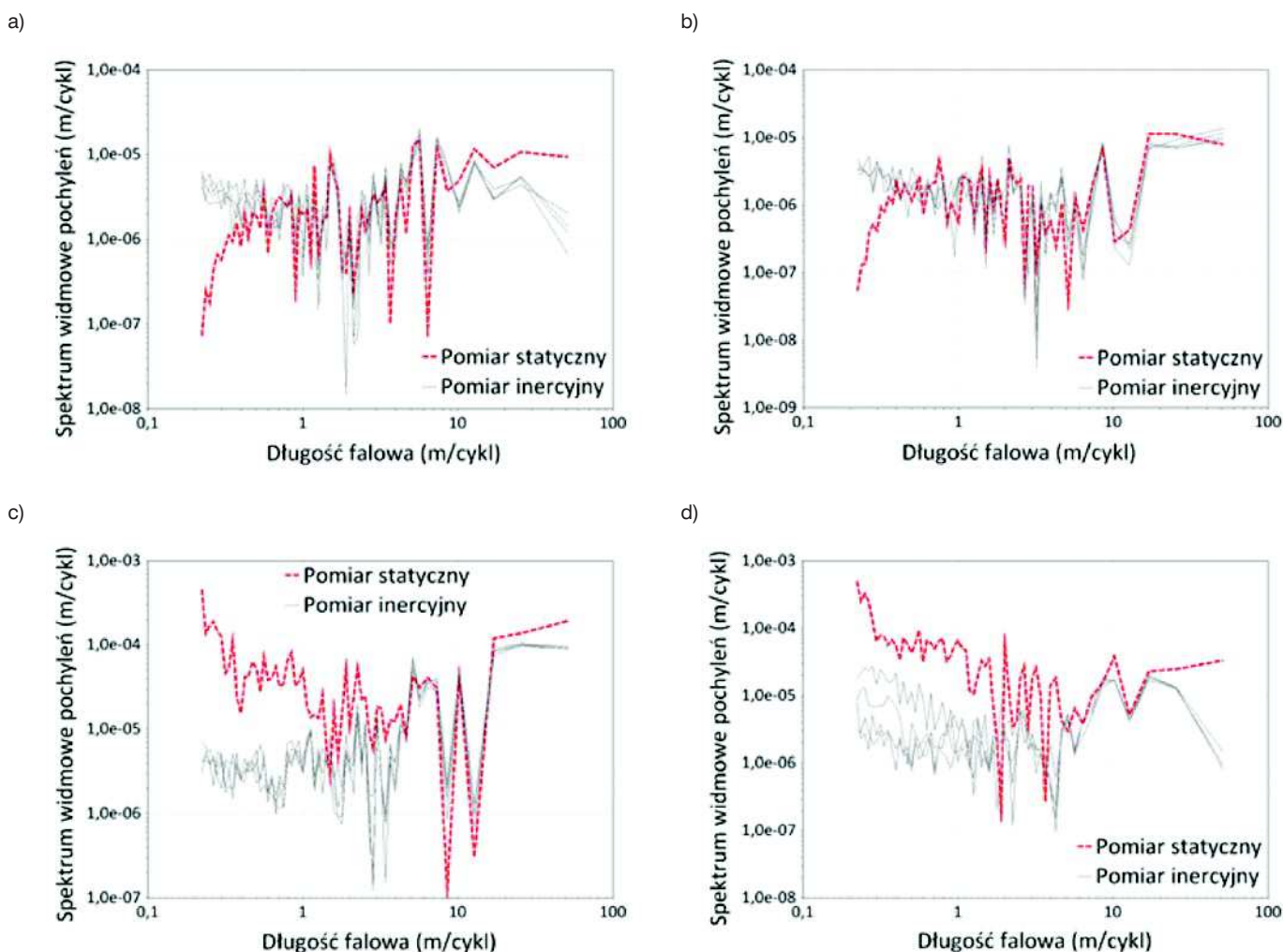
Rys. 9. Graficzna ilustracja idei transformaty Fouriera

Wartości funkcji PSD na pierwszym i drugim odcinku pomiarowym dla krótkich fal (o długości mniejszej niż 1 m) są mniejsze w przypadku pomiaru statycznego niż w przypadku pomiaru inercyjnego. Natomiast na trzecim i czwartym odcinku wartości funkcji opisującej spektrum widmowe są zdecydowanie większe w przypadku pomiaru statycznego w zakresie tzw. krótkich fal. Dlatego, w odniesieniu do trzeciego i czwartego odcinka zbadano wpływ zastosowania filtra uśredniającego.

## Dobór parametrów filtra uśredniającego

### Profilograf

Użytkownik pomiarów inercyjnych, ma jedynie dostęp do profili poddanych etapowi wstępnego przetworzenia danych (ang. *preprocessing*). Na skutek analizy wyników uzyskanych przy wykorzystaniu profilografu laserowego oznaczono wskaźniki IRI dla wszystkich czterech powtórzeń na każdym z odcinków pomiarowych. Wyniki obliczeń wartości IRI zestawiono w tabeli 1.



Rys. 10. Wartości spektrum widmowego pochyień (oś pionowa, m/cykl) dla odcinków pomiarowych a) nr 1, b) nr 2, c) nr 3, d) nr 4 w funkcji długości falowej (m/cykl)

Tabela 1. Zestawienie wartości IRI oznaczonych przy wykorzystaniu profilografu laserowego

Parametr $r = 0$	Wartości IRI obliczone na podstawie pomiarów profilografem [m/km]*			
	Numer odcinka pomiarowego			
	1	2	3	4
Przejazd 1	1,38	1,01	2,92	1,59
Przejazd 2	1,38	1,16	3,02	1,63
Przejazd 3	1,37	1,04	2,95	1,56
Przejazd 4	1,31	1,10	3,02	1,62
<b>Wartość średnia</b>	<b>1,36</b>	<b>1,08</b>	<b>2,98</b>	<b>1,60</b>

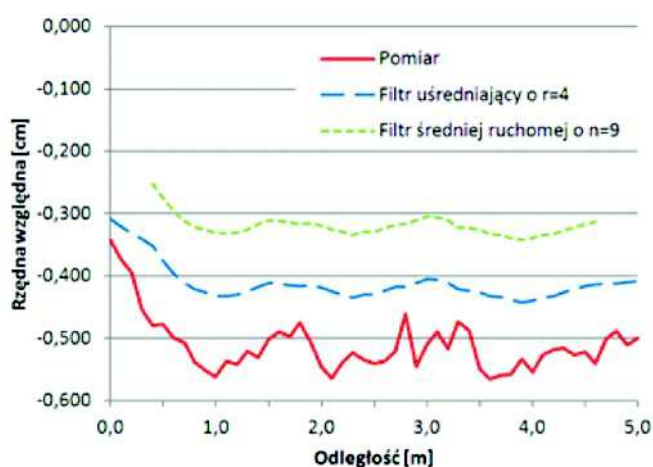
\* Uwaga: Pokazane w tabeli wartości są wynikiem obliczeń dla odcinków między znacznikami z blachy

## Geodezja

Do filtrowania sygnału z pomiaru nierówności zastosowano filtr średniej ruchomej [9]. Definicja filtra ma różne wymiary. Można przyjąć klasyczne rozwiązanie, które w zależności od przyjętego kroku zmienia liczbę danych, tzn. im wyższa wartość okresu średniej ruchomej, tym mniejsza liczba danych przypadających na analizowany odcinek. W przypadku analizy wyników pomiaru równości podłużnej zdecydowanie bardziej praktyczną formułą stanowi definicja filtra średniej ruchomej wyrażona postacią wzoru (2). W artykule nazywa się go krótko filtrem uśredniającym (ang. *Mean Filter*). Dla przykładu, zbiór wyników w postaci  $A = (a, b, c, d, e)$ , w sąsiedztwie o promieniu „ $r$ ” danej wartości  $A_i$  mniejszej lub równej  $(2r+1)$ , poszczególne wyrazy uśrednionego zbioru dla  $r = 2$ , przedstawiają się następująco:

$$\hat{A} = \left[ \frac{1}{3}(a+b+c), \frac{1}{4}(a+b+c+d), \frac{1}{5}(a+b+c+d+e), \frac{1}{4}(b+c+d+e), \frac{1}{3}(c+d+e) \right] \quad (2)$$

Efekt zastosowania filtra średniej ruchomej o okresie  $n = 9$  i odpowiadającego mu filtra uśredniającego o  $r = 4$  pokazano na rysunku 11. Poszczególne profile są rozsunięte względem siebie w celu poprawy czytelności rysunku.



Rys. 11. Wartości względnych rzędnych nawierzchni pobocza bez filtrów oraz poddane działaniu filtra średniej ruchomej i filtra uśredniającego

Wartości wskaźników IRI oznaczonych metodą statyczną obliczono z wykorzystaniem algorytmu komputerowego napisanego we własnym zakresie zgodnie z [1]. Obliczenia wskaźnika IRI przeprowadzono dla każdego z czterech 50-metrowych odcinków oddzielnie. Nierówności żadnego z odcinków nie wpływają na wartości IRI sąsiedniego odcinka. Do filtrowania wpływu fal o różnej długości wykorzystano postać filtra wyrażonego wzorem (2). W tabeli 2 zestawiono uzyskane wartości IRI obliczone zarówno na podstawie profilu bezpośrednio z pomiaru, jak i poddanego działaniu filtra uśredniającego, przyjmując wartości parametru  $r$  w zakresie wartości od 1 do 7.

Tabela 2. Zestawienie wartości wskaźników IRI obliczonych dla różnych wartości parametru „ $r$ ” filtra uśredniającego

Numer odcinka pomiarowego	1	2	3	4
Nachylenie podłużne niwelety, %	$i = 0,06\%$	$i = 0,12\%$	$i = 0,81\%$	$i = 0,37\%$
Wartości IRI [m/km]				
Wartości IRI na podstawie profili bezpośrednio z pomiarów ( $r = 0$ )	1,37	1,07	3,61	1,84
Parametr $r$	-----			
1	1,35	1,04	3,55	1,83
2	1,30	0,99	3,44	1,79
3	1,23	0,93	3,31	1,74
4	1,16	0,86	3,17	1,68
5	1,10	0,80	<b>3,02</b>	<b>1,61</b>
6	1,04	0,75	2,87	1,54
7	1,00	0,71	2,74	1,47

W zestawieniu w tabeli 3 pokazano względne różnice między wartościami wskaźników IRI oznaczonymi metodą statyczną, a wartościami uzyskanymi na podstawie czterech powtórzeń profilografem. W tabeli 4 zestawiono względne różnice między wartościami wskaźników IRI oznaczonymi metodą statyczną a wartością średnią uzyskaną ze wszystkich pomiarów profilografem. Wartości parametru „ $r$ ”, dla których spełniony jest warunek  $\delta(r) = \min(1)$  wyróżniono kolorem.

Tabela 3. Zestawienie względnych różnic między wartościami wskaźników IRI oznaczonymi metodą statyczną, a wartościami uzyskanymi z czterech pomiarów profilografem

Numer odcinka pomiarowego	1		2		3		4	
Parametr „ $r$ ” filtra i odpowiadająca mu względna różnica $\delta$ [%]	$r$ [-]	$\delta$	$r$ [-]	$\delta$	$r$ [-]	$\delta$	$r$ [-]	$\delta$
	$\delta 1$	0	<b>0,73</b>	0	5,61	0	19,11	0
1		2,22	1	2,88	1	17,75	1	13,11
2		6,15	<b>2</b>	<b>2,02</b>	2	15,12	2	11,17
3		12,20	3	8,60	3	11,78	3	8,62
4		18,97	4	17,44	4	7,89	4	5,36
5		25,45	5	26,25	5	3,31	<b>5</b>	<b>1,24</b>
6		32,69	6	34,67	<b>6</b>	<b>1,74</b>	6	3,25
7		38,00	7	42,25	7	6,57	7	8,16



Tabela 3. (cd.)

Numer odcinka pomiarowego	1		2		3		4	
	r [-]	δ	r [-]	δ	r [-]	δ	r [-]	δ
δ <sub>2</sub>	<b>0</b>	<b>0,73</b>	<b>0</b>	<b>8,41</b>	0	16,34	0	11,41
	1	2,22	1	11,54	1	14,93	1	10,93
	2	6,15	2	17,17	2	12,21	2	8,94
	3	12,20	3	24,73	3	8,76	3	6,32
	4	18,97	4	34,88	4	4,73	4	2,98
	5	25,45	5	45,00	<b>5</b>	<b>0,00</b>	<b>5</b>	<b>1,24</b>
	6	32,69	6	54,67	6	5,23	6	5,84
δ <sub>3</sub>	<b>0</b>	<b>0,00</b>	0	2,80	0	18,28	0	15,22
	1	1,48	<b>1</b>	<b>0,00</b>	1	16,90	1	14,75
	2	5,38	2	5,05	2	14,24	2	12,85
	3	11,38	3	11,83	3	10,88	3	10,34
	4	18,10	4	20,93	4	6,94	4	7,14
	5	24,55	5	30,00	<b>5</b>	<b>2,32</b>	5	3,11
	6	31,73	6	38,67	6	2,79	<b>6</b>	<b>1,30</b>
δ <sub>4</sub>	7	37,00	7	46,48	7	7,66	7	6,12
	0	4,38	<b>0</b>	<b>2,80</b>	0	16,34	0	11,96
	1	2,96	1	5,77	1	14,93	1	11,48
	<b>2</b>	<b>0,77</b>	2	11,11	2	12,21	2	9,50
	3	6,50	3	18,28	3	8,76	3	6,90
	4	12,93	4	27,91	4	4,73	4	3,57
	5	19,09	5	37,50	<b>5</b>	<b>0,00</b>	<b>5</b>	<b>0,62</b>
6	25,96	6	46,67	6	5,23	6	5,19	
7	31,00	7	54,93	7	10,22	7	10,20	

Tabela 4. Zestawienie względnych różnic między wartościami wskaźników IRI oznaczonymi metodą statyczną a wartością średnią z pomiarów profilografem

Numer odcinka pomiarowego	1		2		3		4	
	r [-]	δ	r [-]	δ	r [-]	δ	r [-]	δ
δ <sub>sr</sub> *	<b>0</b>	<b>0,73</b>	<b>0</b>	<b>0,70</b>	0	17,52	0	13,04
	1	0,74	1	3,61	1	16,13	1	12,57
	2	4,62	2	8,84	2	13,44	2	10,61
	3	10,57	3	15,86	3	10,05	3	8,05
	4	17,24	4	25,29	4	6,07	4	4,76
	5	23,64	5	34,69	<b>5</b>	<b>1,41</b>	<b>5</b>	<b>0,62</b>
	6	30,77	6	43,67	6	3,75	6	3,90
7	36,00	7	51,76	7	8,67	7	8,84	

\* wartość obliczona dla IRI z pomiarów geodezyjnych i średniej wartości z pomiaru profilografem (tab. 1)

Wartość parametru „r” na pierwszym i drugim odcinku pomiarowym wynosi zero, co oznacza, że wyniki oznaczenia metodą statyczną są w pełni zgodne z wynikami uzyskanymi przy użyciu profilografu i nie wymagają zastosowania fil-

tra. W przypadku odcinka numer trzy i cztery, do uzyskania zgodności zastosowano filtr uśredniający z parametrem „r” o wartości, która pozwala zredukować wpływ fal o długości poniżej 1 metra (r = 5).

## Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono uproszczoną charakterystykę dwóch metod pomiarowych. Pierwsza to klasyczna metoda statyczna, druga to pomiary z wykorzystaniem profilografu laserowego. Analizie poddano wyniki pomiaru nierówności podłużnej na czterech niezależnych odcinkach nawierzchni utwardzonego pobocza o długości 50 m każdy. Dla pomiarów inercyjnych w pierwszej kolejności obliczono wartości IRI w przypadku każdego powtórzenia (przejazdu profilografem) w sposób niezależny od siebie. W dalszej kolejności do porównania z wynikami obliczeń metodą geodezyjną wzięto pod uwagę średnią obliczoną z czterech przejazdów. Z uwagi na to, że użytkownik profilografu ma do dyspozycji profile, które są już wstępnie przetworzone, zabiegowi filtracji (niezwiązanej z obliczaniem wskaźnika IRI) poddano wyłącznie wyniki pomiarów wykonanych metodą statyczną. Przygotowane w ten sposób profile wykorzystano do obliczenia wskaźników IRI.

W odniesieniu do wyników pomiaru statycznego zauważono, że na trzecim i czwartym odcinku pomiarowym wpływ fal o długości poniżej 1 m jest na tyle istotny, że na tych odcinkach konieczne jest zastosowanie filtra uśredniającego. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów można zauważyć, że dla analizowanych przypadków przy wartościach parametru „r” filtra uśredniającego, redukującego wpływ fal o długościach poniżej 1 m, względna różnica między wartościami IRI, obliczonymi na podstawie pomiarów profilografem i metodą statyczną jest mniejsza niż 2% co wskazuje, że uzyskanie zgodnych wyników między tymi metodami pomiarowymi jest możliwe.

Warto jednak podkreślić, że przedstawione wyniki badań są jedynie przesłanką kierunku dalszych analiz profili podłużnych nawierzchni uzyskanych przy wykorzystaniu opisanych w artykule metod. Chcąc bowiem jednoznacznie wskazać zasady doboru parametru „r” filtra uśredniającego, należy zaplanować eksperyment z większą populacją odcinków pomiarowych zarówno o różnych nachyleniach niwelety jezdni, jak i wskaźnikach równości podłużnej.

## Bibliografia

- [1] ASTM E1926-08 Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements
- [2] ASTM E13364-95 (Reapproved 2012) Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method
- [3] Brown D., Liu W., Henning T. F. P., Identifying pavement deterioration by enhancing the definition of road roughness, NZ Transport Agency research report 430, December 2010
- [4] Celko J., Decky M., Kovac M., An Analysis of Vehicle-Road Surface Interaction for Classification of IRI in the Frame of Slovak PMS, Maintenance and Reliability nr 1/2009
- [5] Dynatest 5051 Mk-IV RSP, Test System, Instrukcja Obsługi, wersja 2.0.1, Toropol, Warszawa
- [6] Gillespie T. D., Sayers M. W., Hagan M. R., Methodology for Road Roughness Profiling and Rut Depth Measurement, Federal Highway Administration Report FHWA/RD-87-042, Michigan 1987

- [7] Hunt P., Bunker J., Analysis of Unbound Granular Pavement Deterioration for Use in Asset Management Modelling, A Literature Review, Department of Main Roads, Queensland, 2001
- [8] Sayers M. W., Gillespie T. D., The Ann Arbor Road Profilometer Meeting, Michigan, September 1986
- [9] 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
- [10] Sayers M. W., Karamihas S. M., The Little Book of Profiling. Basic Information about Measuring and Interpreting Roads Profiles, Michigan, 1998
- [11] Szpinek S., Badania równości nawierzchni lotniskowych, „Drogownictwo” 6/2014
- [12] Szpinek S., Niepewność oceny równości nawierzchni drogowej, „Drogownictwo” 3/2013
- [13] Szpinek S., Widmo amplitudowe nierówności podłużnych nawierzchni drogowych, „Drogownictwo” 9/2001
- [14] Wyczałek I., Jamroży P., Wyczałek M., Pomiary płaskości i spadków nawierzchni metodami geodezyjnymi, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 20/2015, 77-92



WIESŁAW DĄBROWSKI

OAT Sp. z o.o.  
wieslaw.dabrowski@oat.pl

## Czas przeszły i przyszły nawierzchni betonowych w Polsce

### Część 1. Wybrane zagadnienia dotyczące dotychczasowych doświadczeń w budowie i utrzymaniu

Na początku XIX wieku rozpoczęto w Polsce budowę dróg o nawierzchni ulepszonej na szeregu odcinków, wykorzystując przy tym najnowsze osiągnięcia techniczne. Zachowana jeszcze z tamtego okresu dokumentacja techniczna dotycząca projektowania i budowy dróg świadczy o wysokim poziomie techniki w dziedzinie drogownictwa w Księstwie Warszawskim, Polsce Kongresowej, a także w Galicji [1]. W latach 1820–1823 wybudowano pierwszą drogę bitą w Królestwie Polskim zwaną *Traktem Brzeskim*. Dzięki temu możliwy stał się eksport wyrobów na chłonny rynek rosyjski. Trakt prowadził z Warszawy przez Mińsk, Siedlce, Międzyrzec, Białą Podlaską, Terespol do Brześcia, a jego długość wynosiła 178 staj czyli blisko 190 km. W 1823 r. wykonano także drogę bitą z Koła do Kalisza o długości 61 staj czyli 65 km. W kolejnych latach budowane były inne odcinki dróg o nawierzchni utwardzonej jak np. *trakt krakowski – do Raszyna*, *trakt poznański – do Oltarzewa*, czy *trakt petersburski do Jabłonny* [2]. Wraz z utratą niepodległości przez Polskę nastąpił okres stagnacji w omawianej dziedzinie. Z uwagi na inne ważniejsze problemy, przestano przywiązywać wagę do rozbudowy dróg. Na dotychczasowych naszych terenach powstawały wprawdzie nowe drogi, ale nie był to spójny system mający na celu powiązanie poszczególnych miast i regionów. Trzy sąsiednie mocarstwa, które zawłaszczyły nasze ziemie, brały pod uwagę wyłącznie własne cele państwowe, a ponadto prowadziły niezależne działania strategiczne. W związku z tym na ziemiach polskich wrogię nam mocarstwa nie dbały o rozbudowę dróg i nie przywiązywały wagi do rozwoju ważnych szlaków komunikacyjnych [1]. Należy tu także dodać, że dodatkowo w tym czasie na ziemiach polskich następował rozwój szlaków kolejowych, które stały się ważnym środkiem komunikacji i przewozu towarów, podobnie jak miało to miejsce w całej Europie.

Na początku XX wieku, wraz z pojawieniem się pierwszych pojazdów samochodowych o napędzie spalinowym, zapoczątkowany został nowy etap w światowym drogownictwie. Udział Polski, która odzyskała niepodległość w wyniku wielkich wydarzeń na scenie europejskiej, był w tym rozwoju stosunkowo niewielki, gdyż pierwsza wojna światowa, a później wyczerpujący konflikt z Rosją Radziecką uniemożliwiły prowadzenie planowej gospodarki drogowej, wobec wielu pilniejszych potrzeb jakie występowały w tym okresie. Liczne oddziały wojskowe, które przemieszczały się wraz ze swoimi taborami przez Polskę, stanowiły ogromne obciążenie dla i tak już niedostatecznej sieci dróg i mostów. Pod koniec pierwszej wojny światowej większość dróg na terenach, które znalazły się w granicach nowo powstałego Państwa Polskiego znajdowała się w stanie prawie całkowitego zniszczenia [1].

W takiej sytuacji powstałe w listopadzie 1918 roku Państwo Polskie przejęło zarząd nad siecią dróg w kraju, który był ogromnie wyniszczony na skutek kilkuletnich działań wojennych. Na terenie wszystkich byłych ziem rozbiorowych rozpoczęto odbudowę dróg i obiektów inżynierskich, ponadto dostosowywano przepisy techniczne, a przede wszystkim podejmowano nowe działania inwestycyjne. Kolejność zadań ustalana była według najpilniejszych potrzeb. W latach 1928–1929 udało się w znacznym stopniu poprawić podstawową sieć dróg w Polsce. Środki na rozbudowę dróg przewidziane w budżecie państwa i uzyskane przez samorządy wystarczały, aby utrzymać drogi w zadawalającym stanie. Światowy kryzys gospodarczy, jaki wystąpił w latach 1926–1933 pozbawił jednak samorządy drogowe prawie wszystkich środków potrzebnych na rozbudowę dróg. Najbardziej krytyczny był rok budżetowy 1932–1933, w którym oszczędności w budżecie państwa wprowadzono w pierwszej kolejności kosztem nakładów na drogownictwo.