



ANDRZEJ POŻARYCKI

Politechnika Poznańska
andrzej.pozarycki@put.poznan.pl



PRZEMYSŁAW GÓRNAŚ

Politechnika Poznańska
przemyslaw.gornas@put.poznan.pl

Filtracja efektów dynamicznych wywołanych w nawierzchni podczas badań ugięciomierzem FWD

Ocenę stanu technicznego nawierzchni określa się poprzez tzw. parametry techniczno-eksploatacyjne, do których zalicza się: 1) nośność, 2) stan spękań, 3) równość podłużną, 4) równość poprzeczną, 5) stan powierzchni, 6) właściwości przeciwpoślizgowe. W hierarchii priorytetów najwyżej stawia się parametr nośności nawierzchni, którego ścisła definicja stanowi wciąż jedno z najbardziej niejednoznacznych pojęć w drogownictwie [13,14,15]. W swoim początkowym okresie, aż

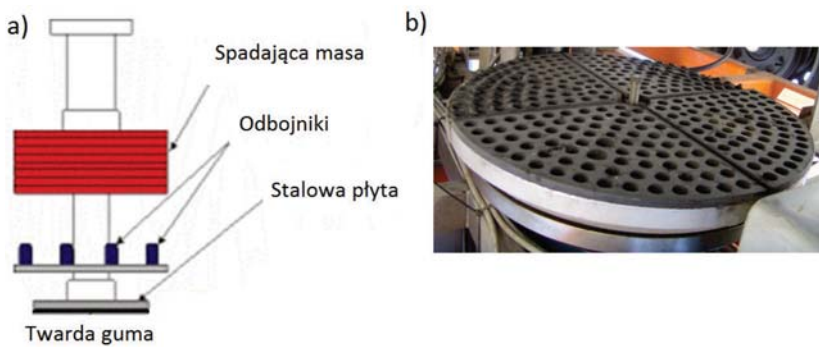
po dzień dzisiejszy, nośność wyraża się poprzez wartość ugięcia nawierzchni oznaczanego najczęściej metodą czasochłonnnych i trudno odtwarzalnych pomiarów przy użyciu belki Benkelmana [11], które stanowią podstawę wymiarowania wzmocnień nawierzchni [12] na drogach o kategorii ruchu $\leq KR4$. Uproszczoną alternatywą jest też pomysł wyrażania nośności poprzez wskaźnik stanu spękań nawierzchni, który wyznacza się na podstawie analizy wyników wizualnej inwentaryzacji [14]. Od momentu, gdy zarządcy dróg mogą swoje laboratoria wyposażać w ugięciomierze dynamiczne typu FWD (ang. *Falling Weight Deflectometer*), pojęcie nośności nawierzchni nabrało nowego znaczenia. Poprzez nośność nawierzchni rozumianą jako *zdolność do przenoszenia obciążeń od ruchu drogowego na podłoże* [15], zaczęto określać liczbę osi obliczeniowych (standardowych), którymi można obciążyć nawierzchnię do momentu utraty przez nią drugiego ze stanów granicznych, wyrażanych trwałością zmęczeniową, obliczaną w przypadku punktów krytycznych zlokalizowanych zgodnie z opisem przedstawionym w katalogu [12]. Za sprawą dokumentów [12,14] zapoczątkowano wprawdzie upowszechnianie się tego rodzaju badań w Polsce, ale niestety do dzisiaj nie ma na świecie opracowanej kompleksowej i uniwersalnej procedury umożliwiającej określenie dostatecznie jednoznacznych i precyzyjnych parametrów warstw badanej nawierzchni i jej podłoża, na podstawie pomiarów nawierzchni urządzeniami FWD [2]. Do uzyskania wiarygodnych rezultatów w zakresie analizy wyników obliczeń dokonanych na podstawie wyników pomiarów ugięć nawierzchni, potrzebne jest duże doświadczenie eksperta, które również nie zawsze gwarantuje poprawność opracowanych wniosków. Konsekwencją są przypadki wykonanych niezależnych opracowań, dotyczących oceny stanu technicznego danej nawierzchni,

których wyniki końcowe dotyczące obliczonych trwałości zmęczeniowych znacząco się różnią. Na taki stan rzeczy ma wpływ wiele czynników, między innymi: zakres badań, lokalizacja punktów pomiarowych, wykorzystane oprogramowanie dla procedury obliczeń odwrotnych (model obliczeniowy nawierzchni, algorytm optymalizacyjny, kryterium dopasowania), wykorzystane kryteria zmęczeniowe. Z przeprowadzonych doświadczeń wynika również, że istotny wpływ na uzyskiwane wyniki ma wykorzystanie konkretnego urządzenia FWD, nawet od tego samego producenta. Pomimo bieżącego serwisowania i prowadzonych testów porównawczych, różnice w wartościach rejestrowanych przemieszczeń dla urządzeń mają istotny wpływ na wyniki procedury obliczeń odwrotnych, a w konsekwencji na obliczane trwałości zmęczeniowe. W efekcie zdecydowana większość zarządców decyduje się na ocenę nośności nawierzchni na podstawie uproszczonych metod. Przykłady nieudanych zabiegów naprawczych, doboru nieodpowiednich remontów/wzmocnień nawierzchni, mogą wynikać ze zbyt uproszczonego podejścia do diagnozy nawierzchni. Z podanych powodów poszukiwanie procedur i metod zwiększających wiarygodność oznaczania parametrów warstw nawierzchni na podstawie badań terenowych, związanych z pomiarem przemieszczeń na jej powierzchni, w dalszym ciągu jest otwartym tematem badawczym.

Specyfika pomiarów nawierzchni ugięciomierzem dynamicznym typu FWD

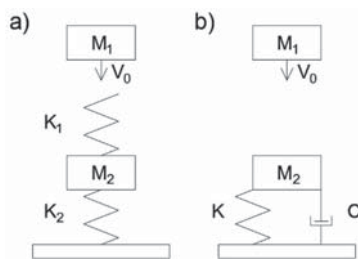
Idea pomiaru ugięciomierzem dynamicznym typu FWD sprowadza się do rejestracji deformacji nawierzchni poddanej obciążeniom dynamicznym. Obciążenie nawierzchni stanowi spadająca z określonej wysokości masa. W dalszej kolejności obciążenie nawierzchni jest efektem przekazania energii uderzenia na powierzchnię nawierzchni poprzez odbojniki, a następnie stalową płytę z przymocowaną do niej od spodu twardą gumą (rys. 1).

Stosowane w ugięciomierzach FWD systemy obciążenia nawierzchni są inne zarówno w przypadku różnych producentów, jak i w przypadku wersji urządzeń przez nich produkowanych. Różnice w systemach między innymi dotyczą geometrii i wagi spadającej masy, układu elementów systemu, geometrii oraz sztywności zastosowanych odbojników, stalowej płyty i twardej gumy umocowanej do jej spodu. Następstwem różnych rozwiązań konstrukcyjnych są odmienne charakterystyki obciążenie-przemieszczenie w stosowanych systemach obciążenia, które można zauważyć na przykład poprzez zbudowanie ich modeli matematycznych. Opracowane modele



Rys. 1. System obciążenia stosowany w urządzeniach typu FWD: a) elementy systemu, b) widok od spodu płyty stalowej z przymocowaną do niej twardą gumą

będą miały bowiem inne układy mas, sprężyn oraz tłumików i/lub będą opisane różnymi wartościami parametrów (M , K , C ; odpowiednio masa, sztywność, współczynnik tłumienia). Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe modele systemów obciążenia stosowanych w urządzeniach typu FWD.



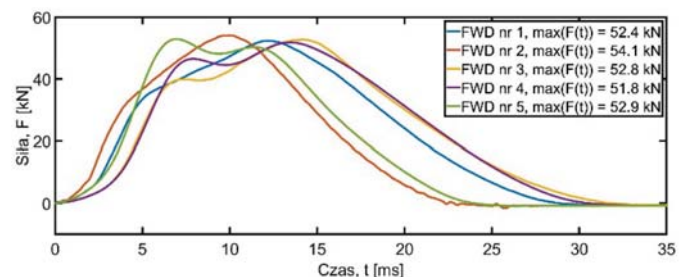
Rys. 2. Modele systemów obciążenia stosowane w urządzeniach typu FWD: a) model z dwoma sprężynami i masą między nimi, b) model z równoległe połączonym tłumikiem i sprężyną [7]

W konsekwencji zarejestrowane w czasie pomiarów ugięcie nawierzchni zmiany obciążenia od spadającej masy, wykonane kilkoma różnymi urządzeniami FWD w warunkach in situ w jednym miejscu pomiarowym na nawierzchni, nie będą takie same, pomimo relatywnie małych różnic między maksymalnymi wartościami (nie przekraczających 5 kN [9]) zarejestrowanych obciążeń (rys. 3).

W następstwie obciążenia nawierzchni z różną zmiennością wartości obciążenia w funkcji czasu (rys. 3), jest różna odpowiedź w postaci przemieszczeń oznaczanych na jej

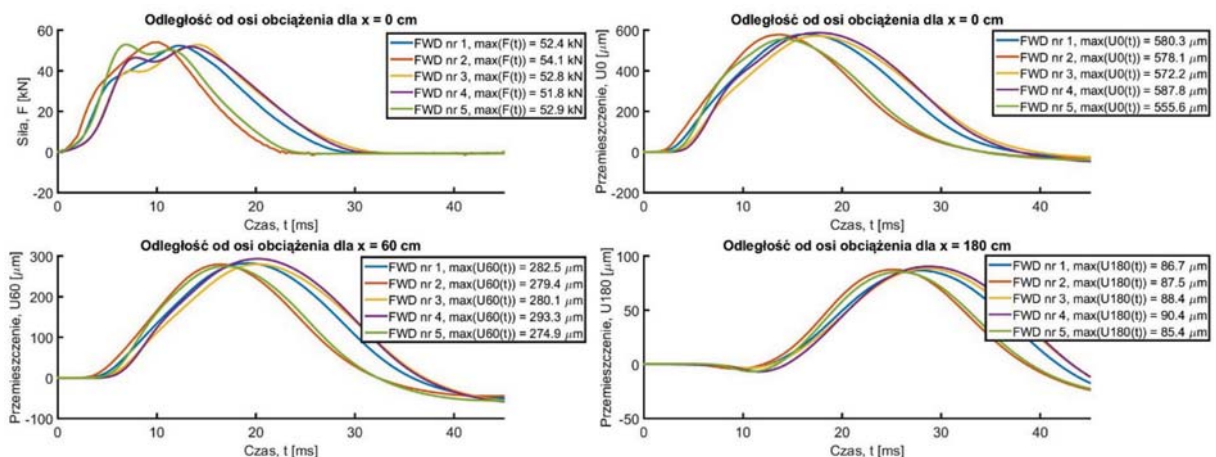
powierzchni. Przykładowe wyniki testów w jednym miejscu pomiarowym, przy wykorzystaniu pięciu różnych urządzeń typu FWD, przedstawiono na rysunku 4. Zostały na nim pokazane wartości obciążenia i pionowych przemieszczeń w funkcji czasu. Wartości przemieszczeń podano w trzech wybranych lokalizacjach przetworników przemieszczeń, a mianowicie: w odległości 0, 60 i 180 cm od osi obciążenia.

Na podstawie jedynie prostej oceny wyników przedstawionych na rysunku 4, można jednoznacznie stwierdzić znaczące różnice w kształtach rejestrowanych wartości obciążeń i przemieszczeń w funkcji czasu, jakie uzyskano w przypadku różnych urządzeń FWD. Niewykluczone jest, że zauważone zjawisko może mieć wpływ na możliwość wykorzystania wszystkich wyników pomiarów, pobranych bezpośrednio z urządzenia do dalszych analiz. Celem uzyskania jednoznacznych i wiarygodnych rezultatów w procedurze obliczeń odwrotnych, bazujących na modelach statycznych i wynikach, które pochodzą z różnych urządzeń, należałoby odfiltrować zarówno wpływ zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego dla systemów obciążenia, jak i wpływ różnych kształtów obciążenia na zachowanie się nawierzchni poddanej impulsowemu obciążeniu. Należy zwrócić uwagę na relatywnie małe różnice w przypadku różnych urządzeń w zakresie zarejestrowanych wartości amplitud (wartości maksymalnych) ugięć i obciążeń (rys. 4), stanowiących podstawę najpowszechniej wykorzystywanej metody, w której nie wykorzystuje się kompletu danych pomiarowych z urzą-

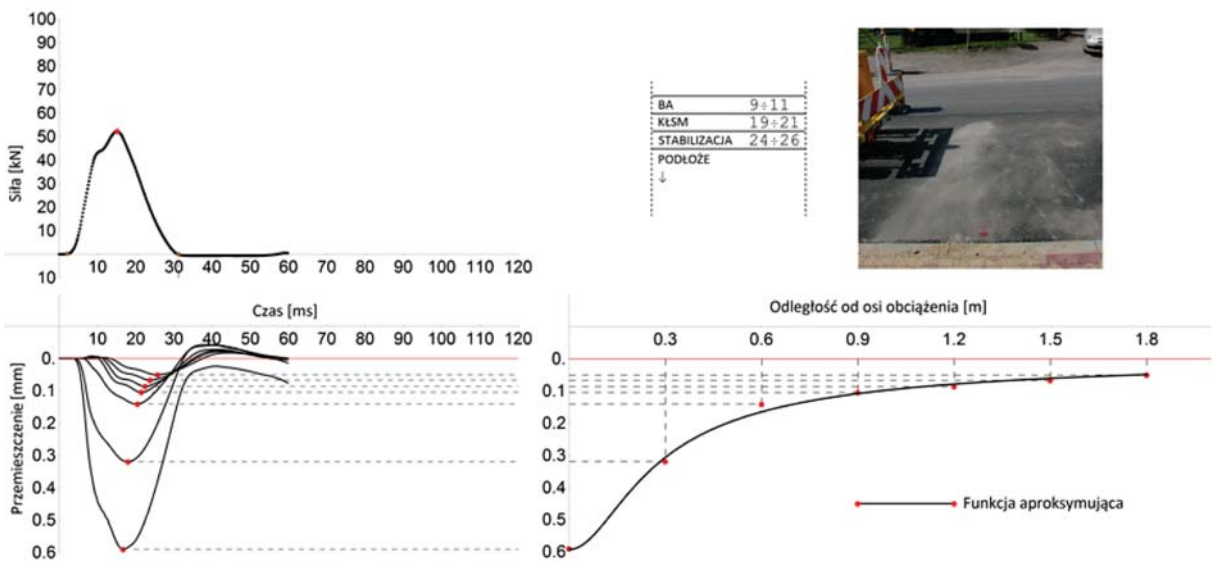


Rys. 3. Zmiany wartości obciążenia w czasie, zarejestrowane w badaniach ugięć nawierzchni w jednym miejscu pomiarowym, przy wykorzystaniu pięciu różnych urządzeń FWD

Rys. 4. Zestawienie wyników pomiaru ugięć nawierzchni pięcioma różnymi urządzeniami FWD w jednym punkcie pomiarowym (od lewego górnego rogu: funkcje obciążenia, funkcje przemieszczeń)



Rys. 5. Schemat budowy klasycznej linii przemieszczeń na podstawie maksymalnych wartości zmierzonych przemieszczeń, które w zależności odpowiadają zdefiniowanej dla pomiaru maksymalnej wartości obciążenia



dzenia FWD, ograniczając się jedynie do tzw. linii przemieszczeń. Schemat budowy linii przemieszczeń przykładowych wyników pomiarów ugięciomierzem dynamicznym, dalej w artykule nazywanej klasyczną linią przemieszczeń, przedstawiono na rysunku 5.

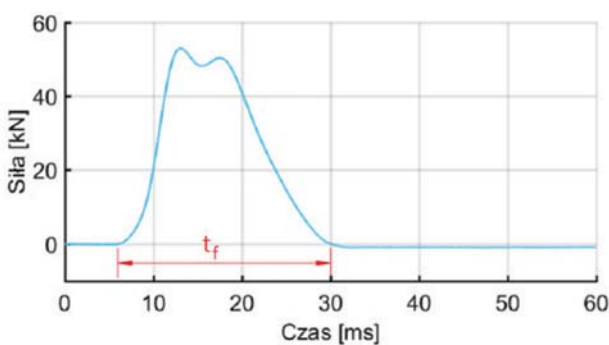
Tabela 1. Zestawienie maksymalnych wartości funkcji obciążenia „max(F(t))” oraz czasów trwania impulsów obciążenia „t_f”

Nr FWD	max (F(t)) [kN]	t _f [ms]
1	52,4	28,9
2	54,1	22,5
3	52,8	31,9
4	51,8	32,5
5	52,9	24,2
maksymalna różnica	2,3 kN	10,0 ms

Ocena różnic w przypadku wyników pomiarów urządzeniami FWD

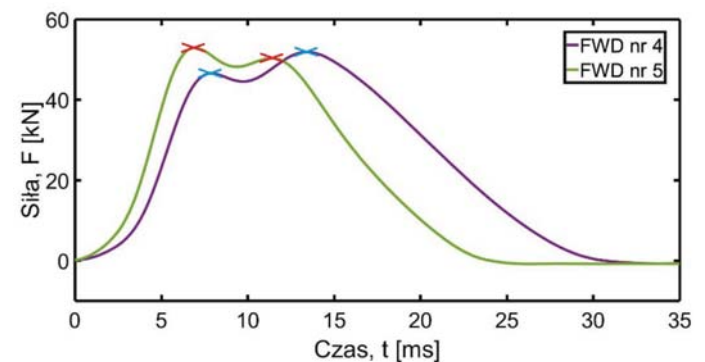
Poddając ocenie różnice między wynikami pomiarów nawierzchni przy wykorzystaniu różnych ugięciomierzy dynamicznych typu FWD (rys. 4), w pierwszej kolejności analizie poddano funkcję obciążenia (rys. 3). Na wpływ zmienności obciążenia w funkcji czasu zwrócili już uwagę autorzy załącznika do wytycznych DSN [16], którzy odnoszą się do czasu trwania impulsu obciążenia (oznaczonego symbolem „t_f” na rys. 6).

Odnosząc się do wartości skrajnych podanych w tabeli 1 (zaznaczonych kolorem czerwonym), zauważono, że dotyczą one wyłącznie tych samych urządzeń (drugiego i czwartego). Innymi słowy, maksymalną wartość siły zarejestrowano w przypadku urządzenia nr 2, co odpowiada minimalnej wartości czasu trwania impulsu w porównaniu do wyników z pozostałych urządzeń. Odwrotną sytuację odnotowano w przypadku urządzenia numer 4. Biorąc jednak pod uwagę wszystkie wyniki pomiarów (obciążenie i przemieszczenia w funkcji czasu, rys. 4) zestawione w tabeli 2, potencjalna zależność nie potwierdza się.



Rys. 6. Schemat określenia czasu trwania impulsu obciążenia „t_f”, typowego w przypadku badań nawierzchni urządzeniami typu FWD

W artykule czas trwania impulsu obciążenia zestawiono dla pięciu przykładowych, różnych ugięciomierzy dynamicznych typu FWD, które zarejestrowano w czasie testów w jednym miejscu pomiarowym (rys. 3). W zestawieniu zamieszczonym w tabeli 1, ujęto również wartości amplitud poszczególnych funkcji obciążenia (wartości maksymalne).



Rys. 7. Lokalizacja lokalnych maksimów funkcji obciążeń w przypadku dwóch przykładowych wyników pomiaru ugięć nawierzchni urządzeniami typu FWD

Tabela 2. Zestawienie maksymalnych zarejestrowanych wartości siły „max(F(t))” i przemieszczeń „max(U(x, t))” oraz czasów trwania impulsów obciążenia „t_i” i przemieszczeń „t_i(x)”

Nr FWD	max (F(t)) [kN]	max (U(x, t)) [μm]			t _i dla F(t) [ms]	t _i (x) [ms] dla U(x,t)		
		x=0 cm	60 cm	180 cm		x=0 cm	60 cm	180 cm
1	52,4	580,3	282,5	86,7	28,9	42,0	40,0	29,2
2	54,1	578,1	279,4	87,5	22,5	40,6	34,5	26,6
3	52,8	572,2	280,1	88,4	31,9	38,7	35,0	30,3
4	51,8	587,8	293,3	90,4	32,5	35,2	32,8	28,9
5	52,9	555,6	274,9	85,4	24,2	31,8	28,9	25,6
maksymalna różnica	2,3 kN	32,2 μm	18,4 μm	5,0 μm	10,0 ms	10,2 ms	11,1 ms	4,7 ms

gdzie: x – odległość od osi obciążenia

Na podstawie analizy wartości zebranych w tabeli 2 można stwierdzić jednak, że na rejestrowane maksymalne wartości przemieszczeń i czasy trwania impulsów ma również wpływ kształt impulsów obciążenia. Fakt ten można w sposób szczególny odnieść do przypadków charakteryzujących się zarejestrowanymi dwoma lokalnymi ekstremami, w których wartość maksymalna obciążenia może wystąpić w każdym przypadku w innych lokalizacjach osi czasu (rys. 7).

Odnosząc się do dotychczas sformułowanych uwag i potencjalnych zależności między kształtem funkcji obciążenia, a maksymalną wartością rejestrowanych przemieszczeń na nawierzchni, można sformułować wniosek, że na kształt klasycznej linii przemieszczeń składają się zarówno konstrukcja samego urządzenia FWD, jak i zachowanie się nawierzchni poddanej impulsowym obciążeniom, czyli tzw. efekty dynamiczne. Podany punkt widzenia wnosi przynajmniej dwa aspekty interpretacji wyników badań nawierzchni urządzeniami FWD. Pierwszy dotyczy procedury porównania wyników między różnymi urządzeniami tego typu, a drugi sposobów przetwarzania wyników w procedurach obliczeń odwrotnych, które powszechnie wykorzystuje się w obliczeniach mechanicznych. W każdym z wymienionych aspektów, w celu ograniczenia skutków niejednakowego sposobu obciążenia nawierzchni można zastosować metody normalizacji. Normalizacja powinna dotyczyć zarówno maksymalnej wartości (amplitudy) siły oraz czasu trwania i kształtu impulsu obciążenia. Zakłada się, że rezultatem takiej normalizacji będą linie przemieszczeń, które pomimo różnych źródeł ich pozyskania w danym miejscu pomiaru, będą się różnić między sobą tylko w zakresie wartości wynikających z dokładności czujników pomiarowych.

Filtracja efektów dynamicznych

Normalizacja amplitudy

W przypadku wyników pomiarów nawierzchni przy wykorzystaniu ugięciomierzy dynamicznych, normalizacja amplitudy dotyczy maksymalnej wartości zarejestrowanego obciążenia. Powszechnie normalizację składowych klasycznej linii przemieszczeń przeprowadza się wykorzystując metodę interpolacji/ekstrapolacji liniowej opisanej wzorem (1).

$$U_{\text{norm}}(F_2) = \frac{F_2}{F_1} \cdot U_{\text{test}}(F_1) \quad (1)$$

w którym:

F₂ – obciążenie, któremu odpowiada znormalizowana wartość ugięcia,

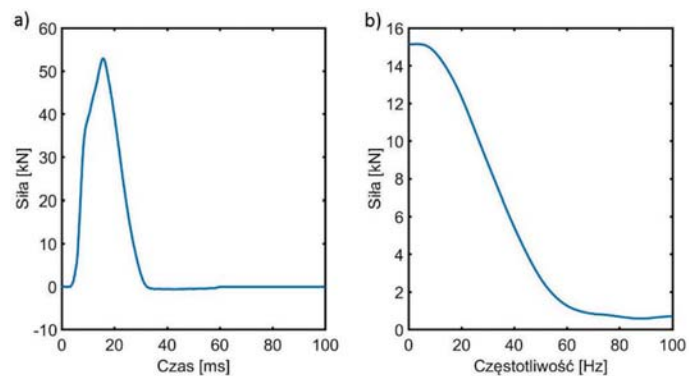
F₁ – maksymalna zarejestrowana wartość obciążenia w trakcie pomiaru, w przypadku którego wartość ugięcia jest znana [9,16].

Normalizacja częstotliwości

Różnica kształtów i czasów trwania impulsów pomiarowych (sygnałów obciążenia i przemieszczeń w funkcji czasu) dla różnych urządzeń FWD, związana jest z występowaniem efektów dynamicznych, których eliminacja jest możliwa w oparciu o metodę opisaną w pracach [5,6]. Dla metody sygnały pomiarowe F(t) i U(x,t), tzn. odpowiednio obciążenie oraz przemieszczenia w funkcji czasu mierzone w odległościach x od osi obciążenia, zostają poddane transformacji dziedziny czasu do częstotliwości. Postać transformaty Fouriera, którą można wykorzystać do tego celu wyrażona jest wzorem (2).

$$\hat{f}(f) = \int_{-T}^T f(t) \cdot e^{-2\pi i f t} dt \quad (2)$$

Przykładowe widmo amplitudowe, jako wynik zastosowania transformaty Fouriera dla kształtu obciążenia w funkcji czasu, typowego dla urządzeń FWD (rys. 8a), przedstawiono na rysunku 8b.



Rys. 8. a) Przykładowy sygnał obciążenia FWD, b) widmo amplitudowe

Podstawę dla procedury eliminacji efektów dynamicznych z danych pomiarowych FWD stanowi założenie, że wartości odpowiadające częstotliwości 0 Hz odpowiadają warunkom pomiarów, jakie uzyskano by w badaniach ugięć nawierzchni poddanej obciążeniom pseudostatycznym (UWAGA: w odróżnieniu od obciążeń pseudostatycznych, przy statycznie obciążonych warstwach nawierzchni i/lub podłoża występują efekty reologiczne i kinematyczne, np. metoda VSS, czyli zjawiska których nie można ocenić stosując impulsowe czasy obciążania nawierzchni, jak w przypadku metody FWD). Schematycznie wyrażeniami (3) i (4) procedurę normalizacji częstotliwościowej sygnałów opisano z wykorzystaniem tzw. szybkiej transformaty Fouriera (ang. *Fast Fourier Transform*, FFT).

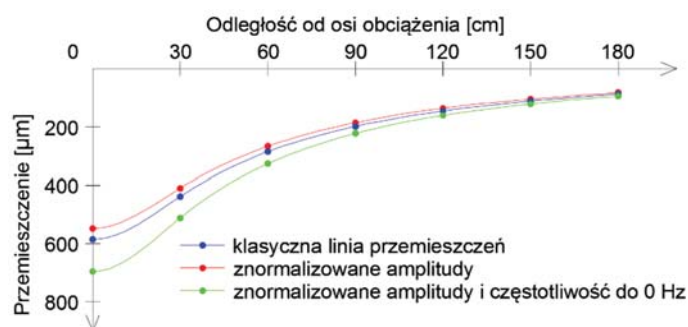
$$FFT[F(t)] \rightarrow F(f) \rightarrow F(f = 0 \text{ Hz}) \quad (3)$$

$$FFT[U(x, t)] \rightarrow U(x, f) \rightarrow U(f = 0 \text{ Hz}) \quad (4)$$

W rezultacie otrzymuje się alternatywną do klasycznej linii przemieszczeń, linię znormalizowaną częstotliwościowo do 0 Hz, pozbawioną wpływu efektów dynamicznych.

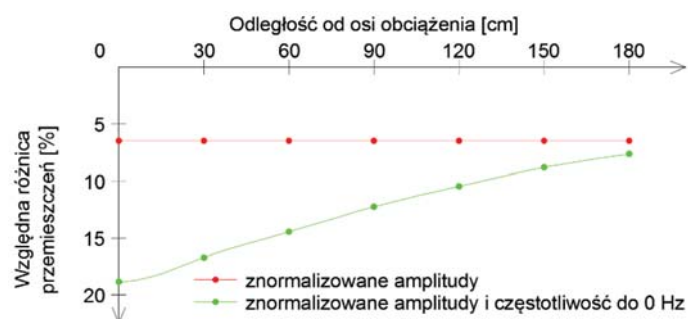
Ocena wpływu poszczególnych technik normalizacji

W celu oceny wpływu poszczególnych normalizacji na linię przemieszczeń, przeprowadzono obliczenia dla losowo wybranego wyniku pomiaru ugięciomierzem FWD, których rezultaty przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Zestawienie linii przemieszczeń poddanych normalizacji

Przyjętą miarą do oceny wpływu normalizacji dla linii przemieszczeń była względna różnica przemieszczeń, przyjmując za referencyjną klasyczną krzywą (rys. 10).



Rys. 10. Zestawienie linii przemieszczeń poddanych normalizacji

Wyniki porównania krzywych przemieszczeń (rys. 10), potwierdziły liniową zależność w przypadku metody normalizacji amplitudowej oraz nieliniowej zależności w przypadku normalizacji częstotliwościowej dotyczącej nieliniowych wpływów dynamicznych.

Eksperyment numeryczny

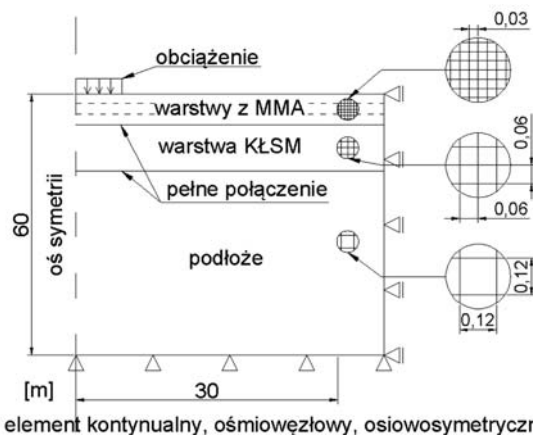
Do weryfikacji poprawności założeń metody normalizacji częstotliwościowej, zaprojektowano i wykonano eksperymen-
t numeryczny. W przeciwieństwie do obliczeń opartych na wynikach badań nawierzchni w terenie, wyniki obliczeń na podstawie eksperymentów numerycznych można w sposób

jednoznaczny zweryfikować, dlatego na tym etapie taki wybór wydaje się uzasadniony. Zakres obliczeń w eksperymencie obejmował opracowanie zestawu wyników dla procedury obliczeń odwrotnych. Źródłem wyników, które wykorzystano jako symulację badań nawierzchni, był model nawierzchni wzorowany na warunkach badań, odnotowanych podczas testów wykonanych przy wykorzystaniu pięciu różnych ugięciomierzy dynamicznych typu FWD. Wyniki obliczeń dla modelu nawierzchni były podstawą do zbudowania zarówno klasycznych linii przemieszczeń, jak i znormalizowanych do częstotliwości równej 0 Hz. Zakres normalizacji nie obejmował normalizacji amplitudowej, która nie ma zastosowania w procedurze obliczeń odwrotnych, wymagającej definicji wartości obciążenia w przypadku modelu obliczeniowego nawierzchni. Wartości obciążenia odpowiadające zbudowanej linii przemieszczeń, tzn. normalizacja amplitudowa, mają zastosowanie w bezpośrednim wykorzystaniu do obliczeń wartości zarejestrowanych przemieszczeń bez definicji wartości obciążenia, np. w procedurze porównawczej ugięciomierzy FWD [16], względnie w projektowaniu konstrukcji nawierzchni na podstawie zarejestrowanych wartości ugięć nawierzchni [12]. Wykorzystując procedurę obliczeń odwrotnych, oznaczono wartości modułów sprężystości, które w dalszej kolejności zastosowano do obliczenia trwałości zmęczeniowych, które teoretycznie odpowiadałyby wynikom uzyskanym w przypadku rezultatów pomiarów pięcioma różnymi urządzeniami FWD.

Modele obliczeniowe

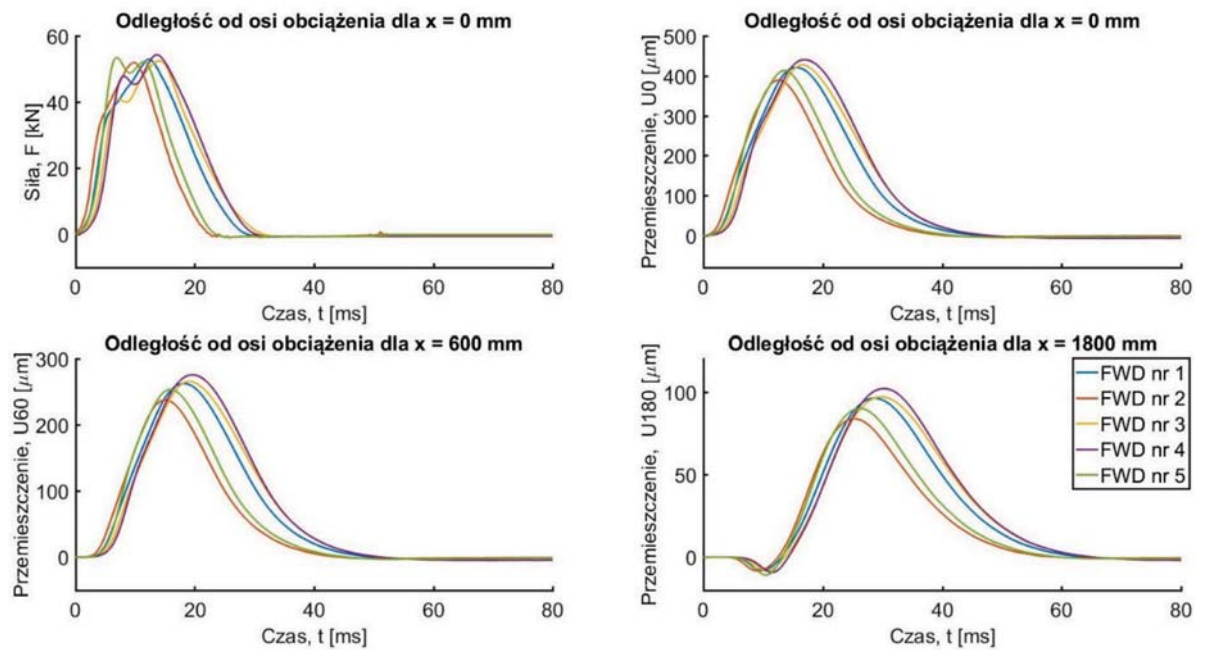
Podstawę obliczeń w eksperymencie numerycznym stanowił wygenerowany zbiór danych w postaci obliczonych ugięć dla teoretycznych modeli nawierzchni. Z założenia w przyjętym modelu numerycznym opartym na metodzie elementów skończonych (w skrócie MES) zdefiniowano warunki odpowiadające w pewnym zakresie tym, które występują w trakcie pomiarów urządzeniami typu FWD:

- 1) obciążenie modelu nawierzchni przyjęto jako równomiernie rozłożone na powierzchni kołowej o promieniu 15 cm,
- 2) ugięcia na powierzchni najwyższej usytuowanej warstwy w modelu obliczono w odległościach: 0; 30; 60; 90; 120; 150; 180 cm od osi obciążenia. Obliczone wartości przemieszczeń pionowych oznaczono w dalszej części artykułu, symbolami odpowiednio: U1, U2, ..., U7.



Rys. 11. Schemat numerycznego modelu nawierzchni MES [4]

Rys. 12. Zbiór wyników obliczeń dla modelu nr „A” (wykresy funkcji przemieszczeń w czasie), dla którego funkcje obciążenia w czasie, odwzorowały wartości sił zarejestrowanych w trakcie badań in situ nawierzchni pięcioma różnymi urządzeniami typu FWD (wykres w lewym górnym rogu)



Podstawowe elementy modelu numerycznego MES zdefiniowano uwzględniając rezultaty uzyskane w pracy [4]. Schemat przyjętego modelu obliczeniowego przedstawiono na rysunku 11.

Obliczenia przeprowadzono dla trzech modeli nawierzchni, których parametry zebrano w tabeli 3.

Tabela 3. Zbiór wyjściowych parametrów modeli nawierzchni

Nr modelu	Moduły sprężystości warstw*			Grubości warstw*	
	E1	E2	E3	h1	h2
A	8000	400	60	0,15	0,20
B	4000	400	60	0,15	0,20
C	8000	400	120	0,15	0,20

* numeracja odpowiednio od warstwy najwyższej (bezpośrednio obciążonej)
 ** dla wszystkich warstw przyjęto jednakową wartość współczynnika Poissona i gęstości, które odpowiednio wynosiły $\nu = 0,3$ [-] i $\rho = 2500$ [kg/m³]

W celu uzyskania, dla pojedynczego modelu nawierzchni, zbioru wyników odpowiadających w pewnym zakresie tym, które by uzyskano z pomiarów różnymi urządzeniami FWD, kolejne obliczenia przeprowadzono definiując obciążenie zgodne z obciążeniami zarejestrowanymi w trakcie badań in situ nawierzchni pięcioma ugięciomierzami (rys. 3). Zbiór wyników obliczeń przeprowadzonych w zakresie analizy dynamicznej dla przykładowego modelu nawierzchni przedstawiono na rysunku 12.

Założenia w przypadku obliczeń odwrotnych i trwałości zmęczeniowych

Obliczone dla modeli zbioru wyników stanowiły podstawę do przeprowadzenia procedury obliczeń odwrotnych, którą wykonano równolegle, biorąc pod uwagę zarówno klasyczne linie przemieszczeń, jak i te znormalizowane do częstotliwości równej 0 Hz. Do obliczeń wykorzystano powszechnie stosowane: 1) model obliczeniowy nawierzchni LET (ang. *Layered Elastic Theory model*) [1], 2) algorytm optymalizacyjny Nel-

der-Mead [3], a do oceny dopasowania zbudowanych linii przemieszczeń z modelu referencyjnego (klasyczne i znormalizowane częstotliwościowo) i obliczeń odwrotnych przyjęto kryterium AVCF (ang. *Area Value with Correction Factor*). Szczegółową postać tego kryterium opisują wzory (5) i (6). Korzyści wynikające z wykorzystania takiej postaci kryterium zostały opisane w pracy [10].

$$\delta_{AVCF} = \left\{ \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{A_i^c - A_i^m}{A_i^m} \right)^2 \right\}^{1/2} + \left| \frac{d_1^c - d_1^m}{d_1^m} \right| \quad (5)$$

$$A_i = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (d_i + d_{i+1}) \cdot (r_{i+1} + r_i)}{2 \cdot d_1}, \quad (i \leq n) \quad (6)$$

w których:

- n – liczba punktów składających się na linię przemieszczeń,
- d_i – wartość przemieszczenia w i -tym punkcie pomiaru (lokalizacja geofonu od osi obciążenia) ugięciomierzem FWD lub obliczeniowego w modelu nawierzchni,
- r_i – odległość i -tego punktu pomiaru/obliczeniowego przemieszczenia od osi obciążenia,
- A_i – parametr skalujący dla i -tego punktu pomiaru/obliczeniowego przemieszczenia,
- c, m – indeksy wskazujące odpowiednio na zmierzone i obliczone wartości przemieszczeń.

Rezultaty wykonanych analiz odwrotnych trzech modeli nawierzchni A, B i C, które obejmowały obliczenia do opracowanego zakresu konfiguracji linii przemieszczeń (klasycznych oraz znormalizowanych do 0 Hz zbudowanych kolejno dla wyników obliczeń w przypadku modeli FEM obciążonych funkcjami odpowiadającymi pięciu różnym urządzeniom FWD), były podstawą do przeprowadzenia obliczeń trwałości zmęczeniowych metodą mechanistyczną. Potrzebne do obliczeń trwałości zmęczeniowej wyniki analizy stanu naprężeń i odkształceń w punktach krytycznych nawierzchni wykonano przy wykorzystaniu modelu LET ze zdefiniowanym obciąże-

niem o ciężarze 50 kN i ciśnieniu kontaktowym 850 kPa oraz parametrami materiałowymi poszczególnych warstw (modułami sprężystości), których źródłem były wyniki przeprowadzonej procedury obliczeń odwrotnych. Do obliczeń metodą mechaniczną wykorzystano kryteria zmęczeniowe opisane w pracy [12], a mianowicie:

- 1) kryterium trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych, które zastosowano dla pierwszej, najwyższej warstwy dla każdego z trzech modeli wyjściowych (tab. 3), (utożsamianej z pakietem warstw z MMA);
- 2) kryterium trwałości zmęczeniowej podłoża, które zastosowano odnośnie najniższej trzeciej warstwy do każdego z trzech modeli wyjściowych (tab. 3), (utożsamianej z warstwą podłoża nawierzchni).

We wszystkich analizowanych przypadkach wykorzystano jednakowe parametry materiałowe warstw z MMA: $V_a = 5,7\%$; $V_b = 12,1\%$; odpowiednio objętościowa zawartość wolnych przestrzeni i lepiszcza.

Wyniki obliczeń odwrotnych i trwałości zmęczeniowych

W tabelach 4 i 5 zestawione są odpowiednio wyniki obliczeń modułów sprężystości i trwałości zmęczeniowej. Wartości modułów są rezultatem obliczeń odwrotnych, a trwałość zmęczeniową obliczono przy wykorzystaniu kryteriów zmęczeniowych opisanych w poprzednich rozdziałach. Wyniki zestawiono dla obliczeń wykonanych w przypadku trzech

Tabela 4. Wyniki obliczeń odwrotnych dla modeli nawierzchni obciążonych funkcjami w czasie, jakie uzyskuje się w trakcie rzeczywistych badań nawierzchni ugięciomierzem FWD

Zestawienie dla klasycznych linii przemieszczeń												
Nr modelu	Nr funkcji obciążenia dla FWD	Moduły sprężystości, MPa						Błąd dopasowania, %	Różnica względna między modułami, %			
		Wartości prawdziwe			Wartości z obliczeń odwrotnych				AVCF	dE1	dE2	dE3
		E1	E2	E3	E1	E2	E3					
A	1	8000	400	60	10325	273	87	0,05	29,06	31,66	44,57	35,10
	2				10844	229	97	0,05	35,55	42,79	61,51	46,61
	3				9448	313	84	0,12	18,10	21,75	40,53	26,79
	4				9714	318	84	0,10	21,42	20,46	39,57	27,15
	5				9698	304	91	0,19	21,22	23,96	52,42	32,53
B	1	4000	400	60	3847	516	80	0,49	3,83	28,96	33,16	21,99
	2				4918	353	89	0,18	22,96	11,85	48,90	27,90
	3				3573	525	78	0,56	10,68	31,25	30,36	24,10
	4				4197	446	79	0,31	4,94	11,54	31,10	15,86
	5				4638	370	86	0,28	15,95	7,51	43,15	22,20
C	1	8000	400	120	9052	343	143	0,03	13,15	14,22	18,82	15,39
	2				9068	341	150	0,02	13,36	14,66	25,09	17,70
	3				8766	347	140	0,01	9,57	13,33	16,25	13,05
	4				8668	373	139	0,04	8,36	6,77	16,05	10,39
	5				9025	341	146	0,01	12,82	14,81	21,30	16,31
Zestawienie dla linii przemieszczeń poddanych normalizacji												
Nr modelu	Nr funkcji obciążenia dla FWD	Moduły sprężystości, MPa						Błąd dopasowania, %	Różnica względna między modułami, %			
		Wartości prawdziwe			Wartości z obliczeń odwrotnych				AVCF	dE1	dE2	dE3
		E1	E2	E3	E1	E2	E3					
A	1	8000	400	60	8053	396	60	0,00	0,66	0,96	0,05	0,56
	2				7997	402	60	0,03	0,04	0,54	0,08	0,22
	3				8002	407	59	0,01	0,03	1,63	0,94	0,87
	4				7953	412	59	0,02	0,59	2,89	0,97	1,48
	5				8020	400	60	0,03	0,25	0,03	0,28	0,19
B	1	4000	400	60	3998	404	60	0,03	0,06	1,03	0,09	0,39
	2				4031	401	60	0,05	0,78	0,21	0,13	0,37
	3				3984	408	59	0,03	0,39	2,08	0,84	1,11
	4				3985	409	59	0,02	0,37	2,17	0,84	1,13
	5				4044	395	60	0,00	1,11	1,31	0,03	0,82
C	1	8000	400	120	8000	400	120	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
	2				7953	408	120	0,05	0,58	2,12	0,22	0,97
	3				7982	408	119	0,03	0,23	1,93	0,70	0,95
	4				8023	402	119	0,00	0,29	0,42	0,50	0,40
	5				8011	403	120	0,04	0,14	0,63	0,18	0,32

Tabela 5. Wyniki trwałości zmęczeniowych obliczonych przy uwzględnieniu wartości zestawionych w tabeli 4

Zestawienie dla klasycznych linii przemieszczeń										
Nr modelu	Nr funkcji obciążenia dla FWD	Trwałość zmęczeniowa [min osi obl. 100 kN]							Różnica względna między trwałościami, %	
		Nbit.	Npodl.	min (Nbit., Npodl.)	Nbit.	Npodf.	min (Nbit., Npodl.)			
A	1	2,26	1,69	1,69	1,89	0,53	0,53	19,30	218,69	218,69
	2	2,29	2,48	2,29				21,26	368,42	332,45
	3	2,17	1,34	1,34				14,62	153,14	153,14
	4	2,27	1,40	1,40				19,87	164,77	164,77
	5	2,28	1,70	1,70				20,34	220,02	220,02
B	1	1,66	0,35	0,35	1,04	0,16	0,16	59,95	114,54	114,54
	2	1,20	0,48	0,48				16,02	194,49	194,49
	3	1,65	0,31	0,31				59,13	88,72	88,72
	4	1,38	0,33	0,33				32,84	105,33	105,33
	5	1,19	0,41	0,41				14,97	151,42	151,42
C	1	2,75	4,41	2,75	2,52	2,34	2,34	9,08	88,32	17,22
	2	2,80	5,06	2,80				11,18	115,92	19,47
	3	2,63	3,93	2,63				4,66	67,64	12,47
	4	2,76	3,85	2,76				9,48	64,30	17,65
	5	2,74	4,63	2,74				8,79	97,61	16,91
Zestawienie dla linii przemieszczeń poddanych normalizacji										
Nr modelu	Nr funkcji obciążenia dla FWD	Trwałość zmęczeniowa [min osi obl. 100 kN]							Różnica względna między trwałościami, %	
		Nbit.	Npodl.	min (Nbit., Npodt.)	Nbit.	Npodt.	min (Nbit., Npodl.)			
A	1	1,89	0,53	0,53	1,89	0,53	0,53	0,12	0,49	0,49
	2	1,90	0,53	0,53				0,48	0,16	0,16
	3	1,92	0,53	0,53				1,32	0,72	0,72
	4	1,93	0,52	0,52				1,86	1,04	1,04
	5	1,90	0,53	0,53				0,23	0,08	0,08
B	1	1,05	0,16	0,16	1,04	0,16	0,16	1,30	0,68	0,68
	2	1,04	0,16	0,16				0,73	1,19	1,19
	3	1,06	0,16	0,16				2,38	0,25	0,25
	4	1,06	0,16	0,16				2,52	0,12	0,12
	5	1,02	0,16	0,16				1,25	0,44	0,44
C	1	2,52	2,34	2,34	2,52	2,34	2,34	0,00	0,00	0,00
	2	2,55	2,32	2,32				1,24	0,89	0,89
	3	2,55	2,31	2,31				1,17	1,45	1,45
	4	2,53	2,33	2,33				0,49	0,45	0,45
	5	2,53	2,34	2,34				0,61	0,00	0,00

modeli nawierzchni A, B i C, w których wartości modułów sprężystości poszczególnych warstw są pewne (tabela 3) i dlatego nazywa się je tutaj wartościami prawdziwymi. Do obliczenia względnych różnic między wartościami prawdziwymi, a tymi z obliczeń (zarówno w odniesieniu do modułów sprężystości, jak i trwałości zmęczeniowych) wykorzystano formułę określoną ogólnym wzorem (7).

$$\Delta = \left| \frac{T - A_p}{A_p} \right| \cdot 100\% \quad (7)$$

w którym:

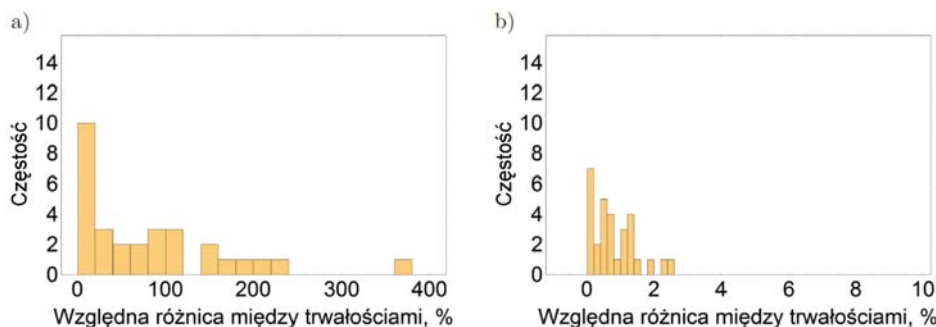
Δ – błąd względny [%],

T – wartość prawdziwa,

A_p – wartość porównywana (wartość z obliczeń).

Dyskusja wyników

Przyjmując za wykładnię założenia przyjęte w niniejszym artykule, zaobserwowane w tabelach 4 i 5 rozrzuty obliczo-



Rys. 13. Względny błąd (wielkość Δ) między wartościami trwałości zmęczeniowych policzonymi dla: a) klasycznej linii przemieszczeń, b) linii przemieszczeń znormalizowanej do częstotliwości 0 Hz

nych wartości modułów sprężystości i trwałości zmęczeniowej stanowią rezultat wyłącznie obliczeń odwrotnych. Przede wszystkim należy zauważyć, że bezpośrednią przyczyną nie jest tu algorytm optymalizacyjny wykorzystany w obliczeniach odwrotnych. Bezpośrednią odpowiedzialność za rozrzut wartości obliczonych modułów sprężystości w opisanym eksperymencie ponosi przyjęty w sposób zamierzony, model statyczny nawierzchni w połączeniu z dynamicznymi wynikami obliczeń dla modelu odpowiadającego warunkom pomiarów urządzeniem FWD. Uzyskany zbiór obliczonych wartości w przypadku klasycznie wyznaczonej linii przemieszczeń (podejście standardowe) obarczony jest wyłącznie błędem niezgodności między schematami obciążenia nawierzchni in situ podczas badań FWD, a przyjętymi na potrzeby obliczeń odwrotnych. W następstwie, wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej, które uzyskano za sprawą filtracji efektów dynamicznych (normalizacja częstotliwościowa do 0 Hz) znacznie mniej się różnią od wartości prawdziwych w porównaniu do trwałości zmęczeniowej opartej na standardowej procedurze obliczeń odwrotnych (rys. 13).

W praktyce przewagą modeli statycznych w porównaniu do modeli dynamicznych jest liczba parametrów, która w pierwszym przypadku jest mniejsza. Bardziej zgodny z rzeczywistością model nawierzchni oznacza zazwyczaj większą liczbę parametrów, w porównaniu do prostszych modeli. W tym kontekście przedstawiona koncepcja normalizacji wyników badań nawierzchni urządzeniami FWD wydaje się prawidłowa, a w połączeniu ze statycznymi modelami w obliczeniach odwrotnych korzystny wpływ na wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej jest jednoznaczny.

Wnioski

Artykuł dotyczy filtracji efektów dynamicznych wywołanych impulsowym uderzeniem spadającej masy na nawierzchnię, czyli oceny skutków zastosowania metody wymuszenia obciążenia nawierzchni, charakterystycznej w przypadku urządzeń typu FWD. Opisaną propozycję normalizacji częstotliwościowej zweryfikowano w porównaniu do wyników obliczeń odwrotnych i trwałości zmęczeniowej nawierzchni. Stwierdzono, że przy zastosowaniu modeli obliczeniowych w standardowych procedurach obliczeń odwrotnych wykorzystanie normalizacji znacząco redu-

kuje niepewność oznaczenia trwałości zmęczeniowej, a względna wartość błędu jaki się popełnia jest mniejsza niż 3%, w przeciwieństwie do wyników obliczeń bez normalizacji.

Warto tu również podkreślić fakt, że proces ujednoczenia stanowi interesująca alternatywę usystematyzowania procedur analiz porównawczych, opartych na wynikach badań nawierzchni różnymi urządzeniami typu FWD.

Artykuł został opracowany w oparciu o pracę wykonaną w ramach realizacji grantu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju o numerze PBS3/B6/38/2015 „Precyzyjny system identyfikacji parametrów nośności konstrukcji jezdni w prognozowaniu czasu życia nawierzchni drogowych”.

Bibliografia

- [1] Firlej S., Mechanika nawierzchni drogowej, Petit s.c., Lublin, 2007
- [2] Firlej S., Wyznaczanie parametrów modelu nawierzchni drogowej z dynamicznych badań FWD, Monografie, Politechnika Lubelska, 2015
- [3] Fuchang G., Lixing H., Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters, Computational Optimization and Applications, 51(1):259-277, 2012
- [4] Górnaś P., Pożarycki A., Wybrane cechy numerycznych modeli MES w analizie odwrotnej konstrukcji nawierzchni, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 13(3):203-222, 2014
- [5] Guzina, B. B., Osburn, H. R., Effective tool for enhancing elastostatic pavement diagnosis, Transportation Research Record 1806(02-3196), 2002
- [6] Kang Y., Multifrequency backcalculation of pavement-layer moduli, Journal of Transportation Engineering, 124(1):73-81, 1998
- [7] Krawczyk B., Identyfikacja parametrów modeli nawierzchni drogowych na podstawie impulsowych testów dynamicznych, Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2012
- [8] Pożarycki A., Analiza trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2009
- [9] Pożarycki A., Górnaś P., Zagadnienia liniowej normalizacji wartości ugięć nawierzchni jezdni poddanej obciążeniom ponadnormatywnym, Drogownictwo, 11:353-361, 2014
- [10] Sangghaleh A., Pan E., Green R., Wang R., Liu X., Cai Y., Backcalculation of pavement layer elastic modulus and thickness with measurement errors, International Journal of Pavement Engineering, 15(6):521-531, 2013
- [11] Norma branżowa: Pomiar ugięć nawierzchni podatnych ugięciomierzem belkowym BN-70 8931-06
- [12] Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2002
- [13] Praca zbiorowa: Opracowanie metodyki sieciowej oceny nośności nawierzchni na podstawie pomiaru ugięć pod obciążeniem dynamicznym, Dro-Konsult, Warszawa, 2008
- [14] System Oceny Stanu Nawierzchni SOSN. Wytyczne stosowania, Załącznik do Zarządzenia Nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 30.04.2015 roku, Warszawa, 2015
- [15] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów. Wytyczne stosowania, Załącznik do Zarządzenia Nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 30.04.2015 roku, Warszawa, 2015
- [16] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów. Załącznik E1. Procedura wykonania przedsezonowych między-laboratoryjnych badań porównawczych ugięć aparatem FWD oraz dopuszczenia do realizacji pomiarów sprzętu pomiarowego, Załącznik do Zarządzenia Nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 30.04.2015 roku, Warszawa, 2015