

## BADANIA SZTYWNOŚCI DYNAMICZNEJ NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ METODĄ FWD

---

**Juliusz Sołkowski**

dr hab. inż., Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, ul. Warszawska 24, 31–155 Kraków, tel: 12 628 2157, e-mail: jsolkow@pk.edu.pl

---

**Streszczenie.** *W artykule przedstawiono wyniki badań terenowych wykonanych w roku 2018 z wykorzystaniem urządzenia do pomiarów sztywności nawierzchni metodą FWD (Falling Weight Deflectometer). Obciążenia (spadająca masa) wywoływała siłę do 100 kN, która była przyłożona do główki szyny nawierzchni w stanie istniejącym (bez demontażu jakiegokolwiek elementu). Pomiary wykonano na nawierzchni podsypkowej z podkładami drewnianymi, z podkładami strumobetonowymi oraz z podkładami stalowymi typu Y. Łącznie wykonano około 2000 pomiarów, w kilku miesiącach na każdej w wymienionych lokalizacji. Pomiary opracowano z punktu widzenia oceny sztywności dynamicznej oraz tłumienia nawierzchni. Wyniki pomiarów skonfrontowano z analizami modelowymi. Wykorzystano dwa modele: dwumasowy o masach skupionych oraz model belkowy. W wyniku prac stwierdzono przydatność metody FWD do oceny stanu nawierzchni szynowej.*

**Słowa kluczowe:** *nawierzchnie podsypkowe, sztywność dynamiczna nawierzchni, tłumienie nawierzchni*

### 1. Wstęp – cel pracy

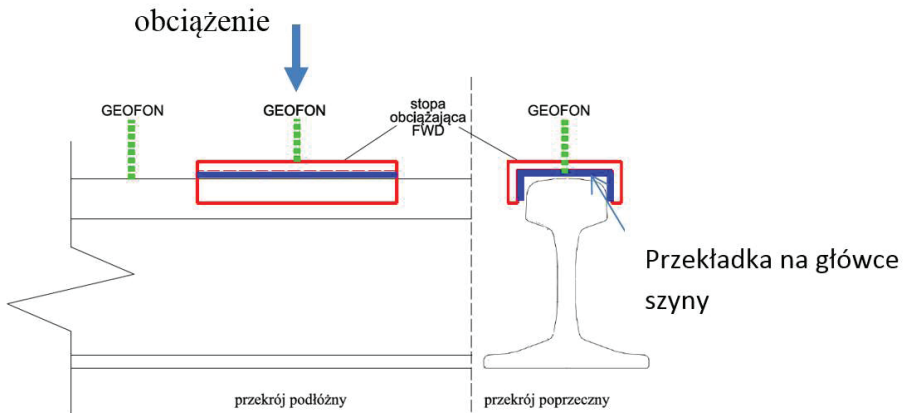
Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie zarysu nowej metody badania sztywności pionowej nawierzchni kolejowej, która oparta jest o zasadę FWD (*Falling Weight Deflectometer*). Jest to metoda tzw. „spadającego obciążenia”, znana z budownictwa drogowego [6] po zaadaptowaniu jej do konstrukcji toru – stąd nazwana przez Autorów FWD-R.

Metoda ta jest całkowicie nieniszcząca, nie wymagająca demontażu jakiegokolwiek elementu nawierzchni. Ta ostatnia cecha odróżnia tą metodę od podobnej – także z zastosowaniem FWD – która była wykorzystywana do badania jedynie sztywności podłoża (tj. podsypki oraz podtorza), po zdjęciu przytwierdzenia. Obciążenie w postaci spadającego ciężaru przykładane było albo do podkładu albo poprzez specjalną płytę do podsypki.

Aktualnie stosowane są różne metody pomiaru sztywności toru. Przykładowo prace [1,4] opisują pomiar ugięcia szyny w oparciu o dane z kamer oraz laserów, natomiast w publikacji [2] wykorzystano wagon wyposażony w dodatkową oś umieszczoną w połowie długości wagonu, która jest opuszczana i podnoszona siłownikiem hydraulicznym. Inną metodą jest pomiar różnic ugięć szyny pod lekkim i ciężkim wagonem [5]. Jeszcze innym podejściem jest pomiar przyspieszeń

osi wagonu (przy uwzględnieniu siły nacisku) wyposażonego dodatkowo w układ oscylujących mas [3]. Na podstawie przyspieszeń osi wyznaczane jest ugięcie szyny. Jeszcze inną metodę zaprezentowano w pracy [7], gdzie zastosowano wzbudnik dynamiczny o małej masie drgającej z dużą częstotliwością.

W odróżnieniu od powyższych metod, metoda FWD-R ma być jak najbardziej zbliżona do rzeczywistych warunków pracy toru oraz ma umożliwiać symulację prędkości jazdy pociągu. Oznacza to, że na główkę jednej szyny wywierane są naciski takie jak eksploatacyjne (rzędu 100-120 kN) oraz, że czas przykładania obciążenia (impuls siły) jest zbliżony do występujących w praktyce (około 100-280 milisekund), co odpowiada prędkości poruszania się pociągu 160 km/h oraz 58 km/h odpowiednio. Długością czasu przykładania obciążenia (impulsem siły) można sterować poprzez zastosowanie przekładek na główce szyny o odpowiednio dobranej sztywności i współczynniku tłumienia (rys. 2,3). Schemat przykładania obciążenia pokazuje rys. 1.



Rys. 1. Schemat głowicy obciążającej składającej się ze stalowej płyty oraz przekładki poliuretanowej o dobranej sztywności. Równoczesnemu pomiarowi podlega siła pionowa oraz ugięcie szyny z wykorzystaniem geofonów

Pomiar prędkości szyny przy pomocy geofonów (maksymalnie kilkanaście sztuk wzdłuż osi szyny) jest całkowany jednokrotnie w celu uzyskania linii ugięcia szyny (rys. 3).

## 2. Zakres badań oraz przykłady wyników pomiarów

W roku 2018 z metodą FWD-R wykonano badania na nawierzchni podsypkowej z podkładami drewnianymi, z podkładami strunobetonowymi oraz z podkładami stalowymi typu Y. Fotografie wykonane podczas pomiarów przedstawiono poniżej (rys. 2,3,4).



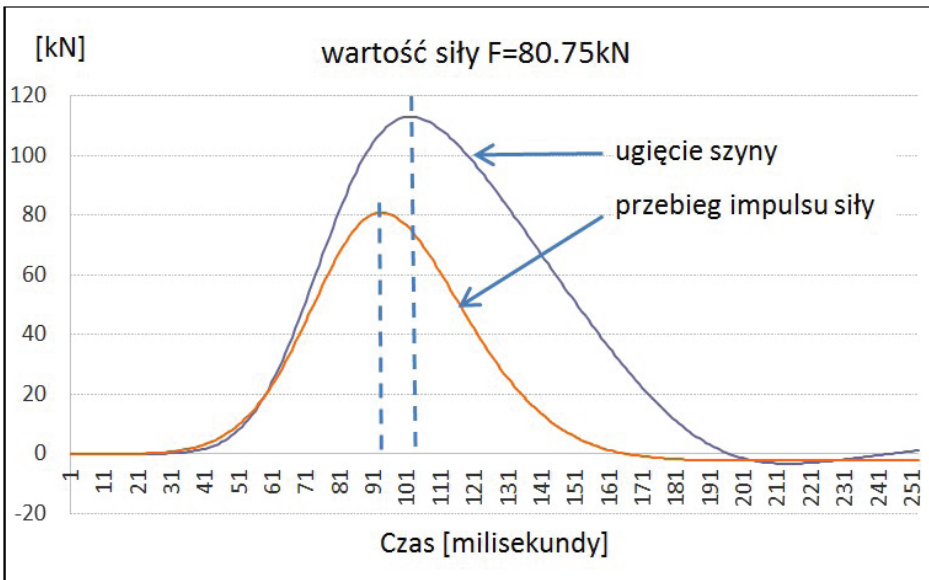
Rys. 2. Układ obciążający szynę (głowica) z widoczną przekładką na głowce szyny



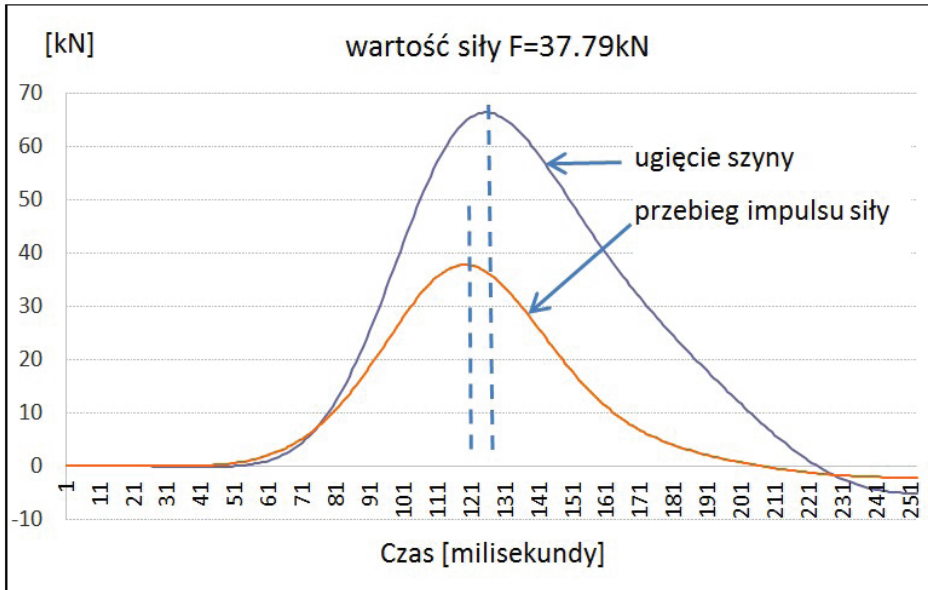
Rys. 3. Przekładka stosowna na głowce szyny. Dobierane są parametry sztywności i tłumienia przekładek w celu sterowania impulsem siły. W środku przekładki widoczny otwór na czujnik prędkości szyny (geofon)



Rys. 4. Maszyna FWD-R podczas pracy na torze. Na widocznym etapie nie jest jeszcze wyposażona w koła kolejowe, stąd konieczność wjazdu na tor po prowizorycznie przygotowanej rampie



Rys. 5. Wykres przyrostu obciążenia i ugięcia w czasie dla siły 80.75 kN [8]. Długość impulsu siły wynosi 140 milisekund, co odpowiada prędkości 116 km/h. Widoczne opóźnienie maksimum ugięcia w stosunku do maksimum siły o około 10 milisekund. Ugięcie maksymalne szyny wynosi 2.21 mm

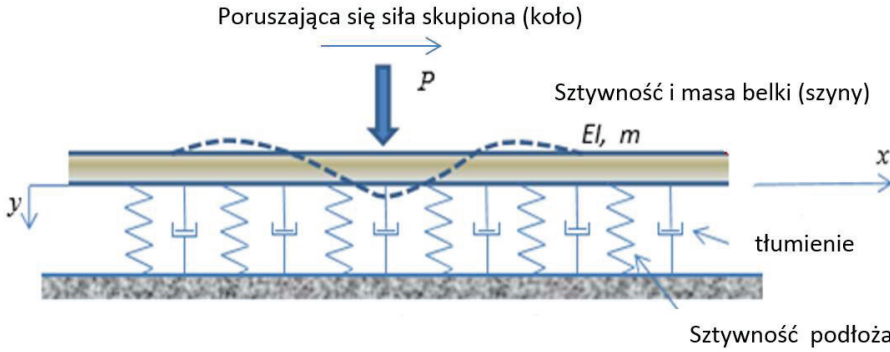


Rys. 6. Wykres przyrostu obciążenia i ugięcia w czasie dla siły 37.79 kN (8). Długość impulsu siły wynosi 170 milisekund, co odpowiada prędkości 95 km/h. Widoczne jest opóźnienie maksimum ugięcia w stosunku do maksimum siły o około 5 milisekund. Ugięcie maksymalne szyny wynosi 1.02 mm

Przykłady wykresów (przebiegi czasowe ugięć oraz impuls siły) pokazane są na rys. 5 oraz rys. 6. Cechą charakterystyczną obu wykresów jest zauważalna asymetria linii ugięcia szyny w punkcie przyłożenia obciążenia (geofon umieszczony w otworze przekładki – jak na rys. 3). Ponadto występuje interesujący efekt opóźnienia ugięcia względem obciążenia, co świadczy o występowaniu tłumienia w nawierzchni. Wykresy te są jakościowo bardzo zbliżone do teoretycznych linii ugięcia szyny pod poruszającym się obciążeniem.

### 3. Przyjęte modele obliczeniowe

Zmierzone efekty w nawierzchni w postaci asymetrii ugięcia dynamicznego szyny oraz opóźnienia maksimum ugięcia w stosunku do maksimum siły – przykładowo pokazane na rys. 5,6 – służą do identyfikacji parametrów dynamicznych nawierzchni z wykorzystaniem modeli teoretycznych. Zastosowano dwa modele analityczne: model belkowy ciągły z obciążeniem poruszającym się z podłożem typu Winklera z tłumieniem wiskocznym (rys. 7) oraz model o masach skupionych zawieszonych w sposób sprężysty również z uwzględnieniem tłumienia wiskotycznego (rys. 9).



Rys. 7. Model belki na podłożu sprężystym z tłumieniem wykorzystywany do identyfikacji parametrów toru

Model pokazany na rys. 7 jest opisany następującym równaniem (np. w [9]):

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + U \cdot w(x,t) = P(t) \cdot \delta(x - vt) \quad (1)$$

gdzie:

$w(x,t)$  - ugięcie belki (szyny),  $E$  - sztywność zginania belki,  $E$  - moduł Younga stali szynowej,  $I$  moment bezwładności pojedynczej szyny,  $m$  - jednostkowa masa belki,  $c$  - współczynnik tłumienia wiskotycznego podłoża belki,  $U$  - współczynnik podłoża szyny (określony jako  $U = C \cdot b_z$ , gdzie  $C$  jest współczynnikiem podłoża,  $b_z$  jest szerokością belki zastępczej przy sprowadzaniu podparcia dyskretnego podkładami do podparcia ciągłego),  $P(t)$  - zmienna w czasie siła pionowa poruszająca się wzdłuż belki.

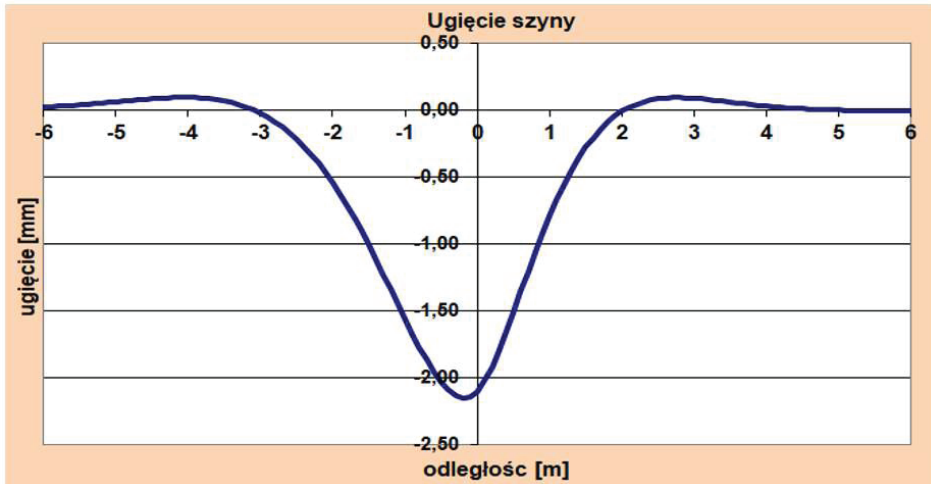
Rozwiązanie stacjonarne w układzie związanym z poruszającą się siłą poszukiwane jest w postaci:

$$w(x,t) = w_0 \cdot w(s,t) \quad (2)$$

gdzie:

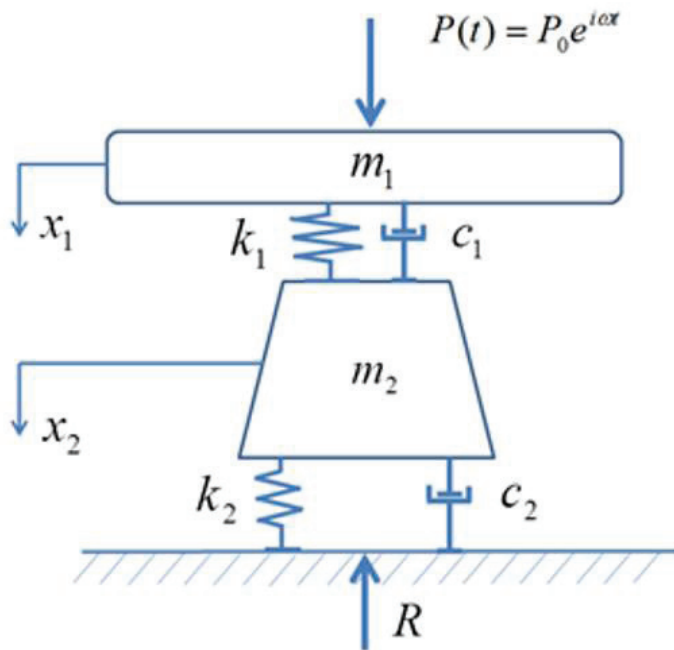
$w_0$  - ugięcia maksymalne szyny,  $w(s,t)$  - dynamiczne linie wpływu ugięcia belki w układzie związanym z poruszającą się siłą (we współrzędnych  $s$ ).

Przykładowy wykres linii ugięcia szyny pokazano na rys. 8. Jak można zaobserwować linia ugięcia jest jakościowo taka sama jak linia ugięcia zmierzona (co do kształtu) – poszczególne parametry wymagają identyfikacji, co umożliwi dopasowanie linii teoretycznej do zmierzonej. Stąd wynikną parametry mierzonego układu (sztywność podłoża oraz tłumienie wiskoczne), przy znanej charakterystyce szyny (profil szyny).



Rys. 8. Linia ugięcia szyny uzyskana z modelu pokazanego na rys. 7. Prędkość poruszającej się siły 116 km/h. Wartość ugięcia maksymalnego 2.15 mm. Sztywność podłoża szyny – tzw. współczynnik podłoża  $U=21.0$  MPa, wsp. tłumienia viskotycznego  $c=200$  kN/s/m/m (por. rys. 5). Niniejszy wykres następnie należy przetransformować do układu związanego z torem i przedstawić w funkcji czasu

Drugi model, który wykorzystano w analizie pokazany jest na rys. 9.



Rys. 9. Model dwumasowy, wykorzystywany w procesie identyfikacji parametrów toru ( $m$  - oznaczają masy elementów,  $k$  - oznaczają współczynniki sprężystości,  $c$  - oznaczają współczynniki tłumienia,  $R$  - jest reakcją podłoża)

Model dwumasowy jest opisany następującymi równaniami:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) = P_0 e^{i\omega t} \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) \end{cases} \quad (3)$$

Z wykorzystaniem powyższego modelu wyznacza się częstotliwości drgań własnych nawierzchni oraz tzw. funkcje przejścia, czyli związek pomiędzy obciążeniem a reakcją dynamiczną podłoża w zależności od częstotliwości drgań ( $\omega$ ). W tym przypadku funkcja przejścia ma następującą postać:

$$T = \frac{\sqrt{k_1^2 + c_1^2 \omega^2} \cdot \sqrt{k_2^2 + c_2^2 \omega^2}}{\sqrt{\left[ m_1(\omega^2 - \omega_0^{(1)2}) \cdot m_2(\omega^2 - \omega_0^{(2)2}) - \omega^2 c_1 c_2 \right]^2 + \omega^2 \left[ c_2(k_1 - \omega^2 m_1) + c_1(k_2 - \omega^2(m_1 + m_2)) \right]^2}} \quad (4)$$

Funkcja powyższa może być wykorzystywana do oceny tłumienia nawierzchni w przenoszeniu drgań do podtorza. Wykorzystując współczynniki, które były przedmiotem identyfikacji w modelu (1), (Rys. 7), z pomiarów (Rys. 5 oraz Rys. 6), można wykonać ocenę wibroizolacyjności nawierzchni. Przy analizach porównawczych z różnymi typami nawierzchni oraz z wbudowanymi wkładkami wibroizolacyjnymi lub bez nich można posłużyć się funkcją tzw. „tłumienia dodanego” (ang. *Insertion Loss*), która jest logarytmiczną miarą różnicy funkcji przeniesienia drgań (4) dla porównywanych przypadków nawierzchni.

$$IL = 20 \log |T_{ref}| - 20 \log |T_{wib}| = 20 \log \left| \frac{T_{ref}}{T_{wib}} \right| \quad (5)$$

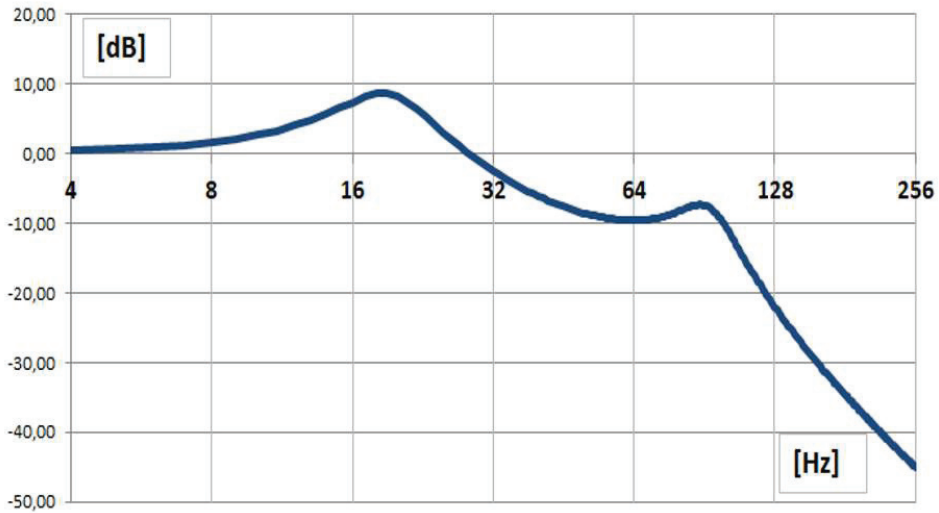
gdzie:

funkcje przejścia  $T$  z indeksem *ref* oznaczają, że wyznaczone są dla nawierzchni referencyjnej (porównawczej), natomiast z indeksem *wib* są dla nawierzchni projektowanej (z wbudowaną wibroizolacją).

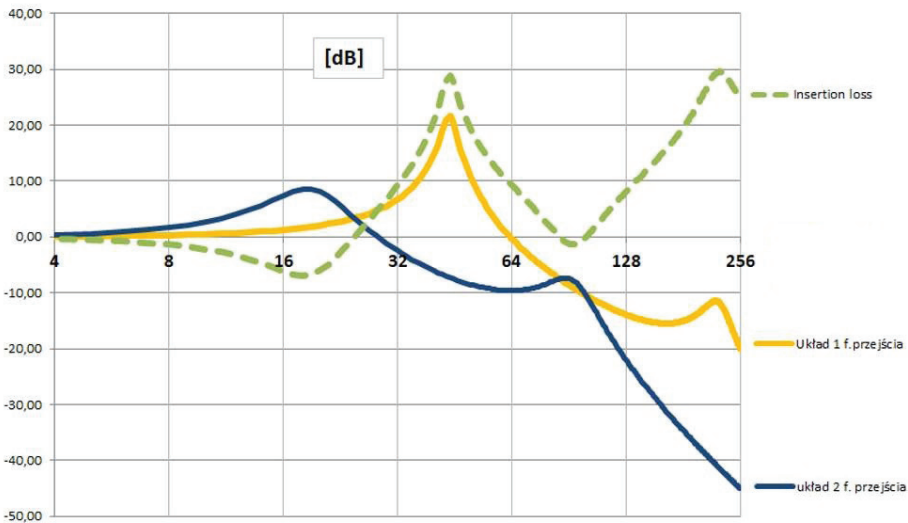
Przykładowy przebieg funkcji przejścia pokazano na rys. 10, natomiast dla porównania z drugą nawierzchnią pokazano także wykres tłumienia dodanego.

Dla porównania poniżej (rys. 11) pokazano wykresy dla nawierzchni bez wbudowanej wkładki wibroizolacyjnej, łącznie z tą, dla której na rys. 10 pokazano funkcję przejścia.





Rys. 10. Przebieg funkcji przejścia dla układu z wbudowaną wibroizolacją. Częstotliwości drgań własnych (piki na wykresie) wynoszą 19,0 Hz oraz 94,0 Hz. Wartości powyżej zera pokazują zachowanie pożądane nawierzchni – tzn. tłumienie drgań



Rys. 11. Przykład przebiegu funkcji przejścia dla układu z wbudowaną wibroizolacją oraz bez niej. Pokazano także funkcję tzw. „tłumienia dodanego”. Częstotliwości drgań własnych dla nawierzchni bez wkładki wibroizacyjnej wynoszą 43,9 Hz oraz 225,4 Hz

#### 4. Wnioski

W artykule przedstawiono bieżącą fazę opracowywania metody pomiaru sztywności dynamicznej oraz tłumienia nawierzchni kolejowej z wykorzystaniem prototypowego urządzenia FWD-R. Pokazano także w zarysie sposób identyfika-

cji parametrów nawierzchni: sztywności oraz tłumienia dla określonych prędkości jazdy pociągów. Na przykładach pokazano także możliwości wykorzystania wyników pomiarów do oceny stanu nawierzchni, w tym także jej parametrów wibroizolacyjnych.

Generalnie, można stwierdzić, że zaproponowana metoda po rozwinięciu zarówno technologii pomiaru jak i obróbki wyników, stwarza duże szanse na praktyczne oraz naukowe zastosowania. Mianowicie, obróbka wyników oraz modelowa identyfikacja parametrów może być wykonywana automatycznie, poprzez moduł liczący dodany do modułów pomiarowych. Ponadto, można także uzupełnić układ pomiarowy o zestaw czujników przyspieszeń przy torze, dzięki którym można będzie wyznaczać funkcję „tłumienia dodanego” stosując maszynę FWD-R jako wymuszenie.

## Bibliografia

- [1] FRA report RR04-03, A Preliminary Design of a System to Measure Vertical Track Modulus from a Moving Railcar, January 2004, <http://www.fra.dot.gov/downloads/-Research/-rr0403.pdf>.
- [2] Li D., Thompson R., Kalay S., Development of Continuous Lateral and Vertical Track Stiffness Measurement Techniques, Proceedings Railway Engineering, London 2002.
- [3] Sussmann T.R., Track Geometry and Deflection from Unsprung Mass Acceleration Data, Proceedings from Railway Engineering Conference, London 2007.
- [4] US Department of Transportation (Shane Farritor), Real-time measurement of truck modulus from a moving car, DOT/FRA/ORD-05/2005.
- [5] Wangqing Z., Geming Z., Kaiming L., Development of Inspection Car from Measuring Railway Track Elasticity, Proceedings from 6th International Heavy Haul Conference, Cape Town 1997.
- [6] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów, Załącznik do Zarządzenia nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 30.04.2015r.
- [7] Krużyński M., Kwiatkowska E., Zwolski J., Badania dynamiczne toru kolejowego, Przegląd komunikacyjny 11/2012.
- [8] Sołkowski J., Siemieński D., Badanie i ocena sztywności nawierzchni kolejowej w oparciu o nową metodę pomiaru, INFASZYN, 2018.
- [9] Sołkowski J., Efekt progowy w nawierzchniach szynowych, Monografia Politechniki Krakowskiej nr 235, Kraków 2013.