

EFEKTYWNOŚĆ WIBROIZOLACJI NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ W UJĘCIU ANALITYCZNYM

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 stosowane miary tłumienia drgań z punktu widzenia konstrukcji nawierzchni szynowej, model tłumienia z wykorzystaniem normy DIN V 45673-4: 2008 oraz obliczenia porównawcze nawierzchni podsypkowych wyposażonych w maty podtłuczniowe. W wyniku obliczeń parametrycznych stwierdzono konieczność ujednoczenia założeń do obliczeń efektywności wibroizolacji, które – zdaniem autora – powinny być wprowadzone przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

Słowa kluczowe: nawierzchnie podsypkowe, maty podtłuczniowe, wibroizolacja, parametry nawierzchni, sztywność nawierzchni

1. Wstęp – cel pracy

Jak pokazują doświadczenia europejskie, maty podtłuczniowe wykorzystywane są w nawierzchniach podsypkowych, jako standardowe elementy przez wszystkie wiodące koleje: DB [3,4,5], ÖBB[11], SNCF [w 8]. Rekomendacje zostały zebrane w karcie UIC 719-1R [8].

W Polsce maty podtłuczniowe stosowane są coraz częściej, jednakże wiedza na ich temat jest jeszcze dość ograniczona. Są one postrzegane przede wszystkim jako element służący do tłumienia drgań. Jest to niepełny obraz, ponieważ w Europie służą także jako element do kształtowania sztywności toru oraz mający funkcję konstrukcyjno-ochronną, dzięki czemu wydłuża się trwałość nawierzchni szynowych.

Dodatkowym problemem w naszym kraju jest brak konkretnych przepisów w instrukcjach PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. odnośnie parametrów samych mat oraz nawierzchni z wbudowanymi matami. Matystosuje się na podstawie aprobat technicznych, które jednakże nie odzwierciedlają rekomendacji zarządcy infrastruktury.

Zdaniem autora istnieje pilna potrzeba wprowadzenia odpowiednich przepisów w zakresie parametrów mat oraz ich obszarów zastosowania. Takie przepisy mogą powstać na podstawie dużego doświadczenia europejskiego z uwzględnieniem spe-

cyfiki polskiej sieci kolejowej. Ponadto, przepisy powinny sformułować wymagania dla nawierzchni kolejowych istotnych z punktu widzenia:

- efektywności wibroizolacji,
- efektywności funkcji ochronnych mat,
- nośności i trwałości toru (w tym ugięć statycznych i dynamicznych szyny).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie zarysu obliczeń efektywności wibroizolacyjności w powiązaniu z parametrami całej nawierzchni szynowej i podłoża, oraz zwrócenie uwagi na konieczność wykonywania obliczeń pracy toru z wbudowanymi matami. Jest to istotne po to aby, świadomie sterować sztywnością toru i nie dopuścić do np. nadmiernych ugięć szyny, które będą obniżały trwałość toru, oraz które mogłyby być nawet niebezpieczne dla ruchu pociągów.

2. Źródła drgań

Drgania (lub tzw. hałas strukturalny np. w [12]) pojawiają się w nawierzchni szynowej w wyniku:

- 1) nierówności powierzchni kontaktu koło-szyna (w tym np. zużycie faliste szyny) – częstotliwości wzbudzenia drgań są wysokie – kilkaset Hz i więcej – np. zużycie faliste o długości fali 50 mm wywołuje drgania o częstotliwości 550-1100 Hz przy prędkościach pojazdów 100-200 km/h,
- 2) niejednorodności podparcia szyny – wynikające np. z różnej sztywności podparcia na podkładach i pomiędzy podkładami – częstotliwości wzbudzenia obliczana jako iloraz prędkości i rozstawu podkładów: v/b [Hz] – częstotliwości w zakresie około 50-100 Hz przy prędkościach 100-200 km/h (rozstaw podkładów $b = 0.6m$),
- 3) występowanie „fali zginania szyny” w trakcie ruchu pojazdu – częstotliwości wzbudzenia jako iloraz prędkości i długości fali zginania:

$$\frac{v}{2\frac{3}{4}\pi L} \approx \frac{v}{4m} = 7-15 \text{ Hz przy prędkościach } 100-200 \text{ km/h}$$

(tutaj: $L = \sqrt[4]{4E / U}$),

- 4) niewyważenie kół pojazdów – częstotliwości $\frac{v}{2\pi r} \approx \frac{v}{3m} = 9-18 \text{ Hz}$ dla po-

wyższego zakresu prędkości (gdzie: r - promień koła).

W torze obserwujemy interferencję powyższych oddziaływań, która może być opisana przy pomocy charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej. Z reguły im większa amplituda drgań, tym mniejsza częstotliwość i odwrotnie. Największą amplitudę (i najmniejszą częstotliwość) posiadają quasi statyczne „fale zginania szyny”.

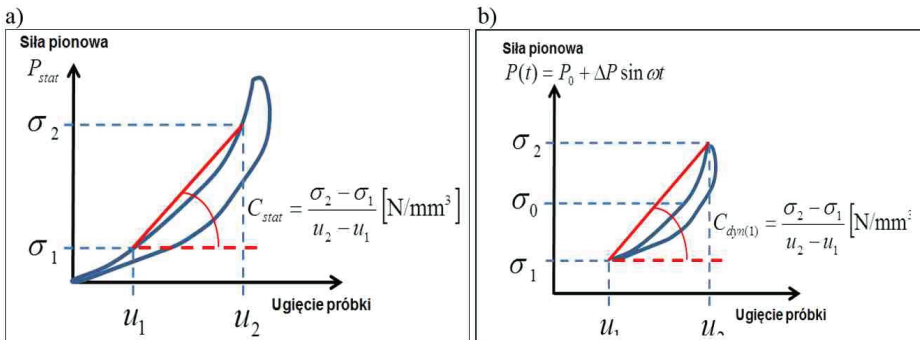
3. Badania mat podtłuczniowych w świetle normy DIN45673-5: 2010 [7]

Wyróżnia się kilkanaście parametrów technicznych mat, które stanowią dwie grupy: parametry mechaniczne (sztywności statyczne i dynamiczne) oraz parametry „środowiskowe” (np. mrozoodporność, ognioodporność, izolacyjność elektryczna, itd.).

Na rys. 1 pokazano stanowisko do badań laboratoryjnych sztywności mat. Natomiast na rys. 2 zilustrowano definicje sztywności statycznej (siecznej) oraz dynamicznej mat wg normy DIN45673-5: 2010.



Rys. 1. Badanie sztywności statycznej i dynamicznej mat - np. [2]



Rys. 2. Definicja sztywności: a) statycznej (siecznej) oraz b) dynamicznej, siecznej, w której pionowa siła harmoniczna wywierana jest z częstotliwością ω na próbkę wokół pewnego wstępnego obciążenia, któremu odpowiada naprężenie σ_0 , pozostałe naprężenia to: σ_1 - dolne naprężenie graniczne oraz σ_2 - górne naprężenie graniczne

Maty podtluczniowe występujące na rynku polskim posiadają świadectwa badań wg tej normy, chociaż nie jest to reguła. Norma ta jest normą referencyjną na kolejach niemieckich, szwajcarskich i austriackich. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. nie wskazuje żadnej normy referencyjnej.

Z punktu widzenia tłumienia drgań oraz pracy toru najważniejsze są:

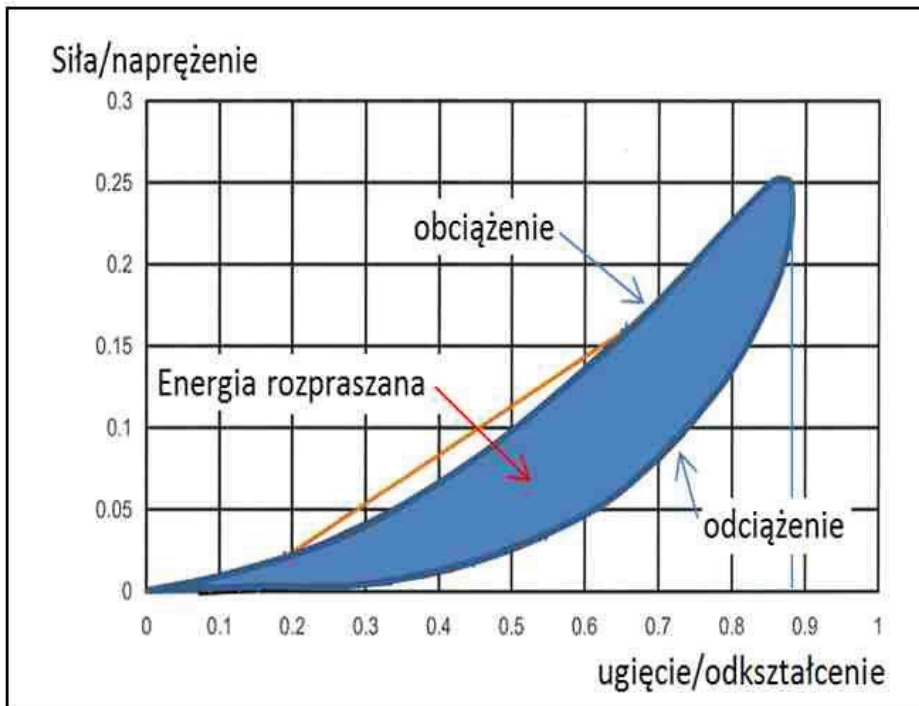
- statyczny moduł sztywności maty,
- dynamiczny moduł sztywności maty dla niskich częstotliwości (30 Hz) oraz wysokich częstotliwości (200 Hz),
- współczynnik usztywnienia dynamicznego, który jest ilorazem sztywności dynamicznej do statycznej,
- współczynnik tłumienia drgań.

Zestawienie sztywności mat stosowanych w Europie podaje karta UIC 719-1R:2011 (rys. 3).

Koleje	Prędkość maksymalna	Obciążenie osi	Stacyjny moduł maty
Niemieckie	$\leq 120 \text{ km/h}$	$> 160 \text{ kN}$	$c_{stat} \geq 0.03 \text{ N/mm}^3$
			$c_{stat} \geq 0.06 \text{ N/mm}^3$
			$c_{stat} \geq 0.10 \text{ N/mm}^3$
Austriackie	$120 < v \leq 200 \text{ km/h}$	Linie główne	$c_{stat} \geq 0.025 \text{ N/mm}^3$
	$v > 200 \text{ km/h}$		$c_{stat} \geq 0.06 \text{ N/mm}^3$
			$c_{stat} \geq 0.10 \text{ N/mm}^3$
Szwajcarskie		Linie główne	$c_{stat} \geq 0.03 \text{ N/mm}^3$
			$c_{stat} \geq 0.06 \text{ N/mm}^3$
			$c_{stat} \geq 0.10 \text{ N/mm}^3$
Francuskie	$\leq 120 \text{ km/h}$	Linie główne	$c_{stat} = 0.025 - 0.045 \text{ N/mm}^3$
	$v > 120 \text{ km/h}$		$c_{stat} = 0.045 - 0.06 \text{ N/mm}^3$
	Strefy przejściowe		$c_{stat} = 0.08 - 0.12 \text{ N/mm}^3$

Rys. 3. Rekomendacje Międzynarodowej Unii Kolejowej (UIC) w zakresie stosowania mat {8}

We wspomnianej normie współczynnik tłumienia drgań traktowany jest jako stały w zakresie częstotliwości do ok. 250 Hz i określany jest jako połowa tzw. współczynnika rozpraszania energii materiału maty (tzw. „lossfactor”) - rys. 4.



Rys. 4. Definicja współczynnika rozpraszania energii

Współczynnik rozpraszania energii dany jest wzorem:

$$\eta = \frac{D}{2\pi E} \quad (1)$$

gdzie:

D - energia rozpraszana (pole powierzchni),

E - energia sprężysta (pole powierzchni pod krzywą odciążenia).

Zgodnie ze wspomnianą normą, współczynnik rozpraszania energii wyznaczany jest z krzywych naprężenia oraz odkształcenia jako tangens kąta przesunięcia w fazie odkształcenia (tzn. opóźnienia odkształcenia względem naprężenia) – rys. 5:

$$\eta = \tan \phi \quad (2)$$

gdzie: ϕ - kąt przesunięcia w fazie pomiędzy siłą/naprężeniem a ugięciem/odkształceniem:

$$\phi = \Delta t \cdot \omega \quad (3)$$

gdzie:

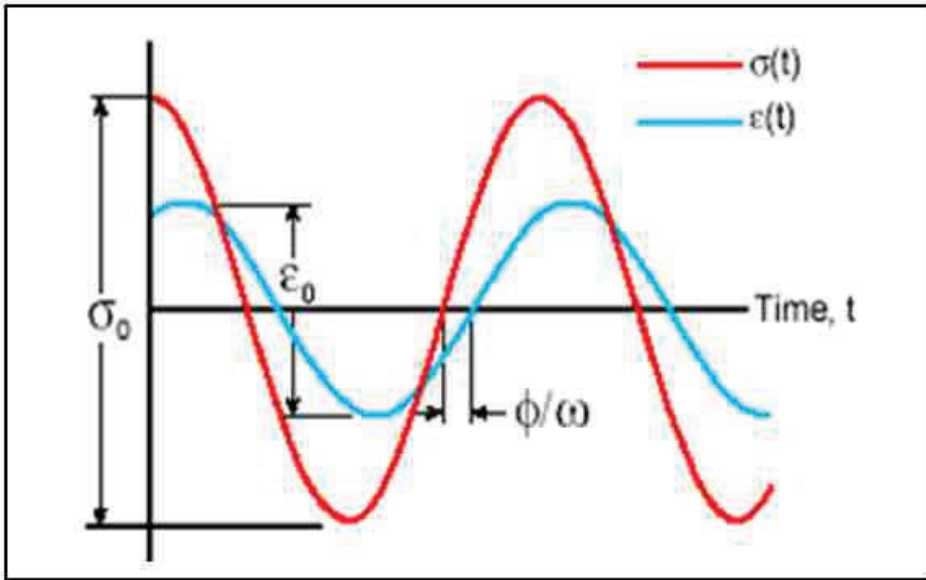
Δt - opóźnienie odkształcenia,

ω - częstotliwość drgań.

Współczynnik rozpraszania energii jest bezwymiarowy i ogólnie zależy od częstotliwości drgań oraz od obciążenia wstępnego (statycznego) [9]. Współczynnik tłumienia drgań jest obliczany w cytowanej normie jako:

$$\delta = \frac{1}{2}\eta \quad (4)$$

Na ogół współczynnik powyższy przyjmuje wartość z zakresu (0.05-0.15) dla większości mat.



Rys. 5. Definicja badania opóźnienia w fazie odkształcenia w stosunku do naprężenia

4. Obliczanie tłumienia dodanego

W języku polskim terminem używanym do określenia efektywności tłumienia jest tzw. „tłumienie dodane” (niem. „*Einfügungsdämm-Maß*” lub ang. „*insertion-loss*”), które jest definiowane jako różnica logarytmów funkcji przeniesienia drgań przez układ nawierzchnia-podtorze w dwóch przypadkach: bez wibroizolacji oraz z wibroizolacją.

Funkcje przeniesienia dla nawierzchni analizowanej (z wibroizolacją) oraz nawierzchni referencyjnej są określone jako:

$$T_{wib} = \frac{\hat{R}_{wib}}{\hat{F}} \quad \text{oraz} \quad T_{ref} = \frac{\hat{R}_{ref}}{\hat{F}} \quad (5)$$

gdzie:

\hat{R}_{ref} - zespolona amplituda reakcji podłoża dla referencyjnego układu nawierzchnia-podtorze,

- \hat{R}_{ref} - zespolona amplituda reakcji podłoża dla analizowanego układu nawierzchnia-podtorze,
 \hat{F} - amplituda siły wymuszającej (zespolona),

Tłumienie dodane do układu w wyniku wbudowania wkładki wibroizolacyjnej jest obliczane jako [6]:

$$IL = 20 \log \left| \frac{T_{ref}}{T_{wib}} \right| - 20 \log |T_{wib}| = 20 \log \left| \frac{T_{ref}}{T_{wib}} \right| \quad \text{lub} \quad IL = 20 \log \left| \frac{\hat{R}_{ref}}{\hat{R}_{wib}} \right| \text{ dB} \quad (6)$$

Jak widać w powyższych wzorach, problem wyznaczenia tłumienia dodanego sprowadza się do wyznaczenia reakcji dynamicznej (zespolonej) podłoża dla układu analizowanego w stosunku do referencyjnego. Norma DIN V 45673-4: 2008 sugeruje następujące modele w celu wyznaczenia reakcji dynamicznej podłoża:

- modele o masach skupionych (modele dyskretne),
- modele dyskretno-ciągłe, gdzie szyna jest traktowana jako belka Bernoulliego-Eulera lub Timoshenki – np.[10],
- modele numeryczne 3D.

Bez względu na typ modelu, w opisie występujących warstw nawierzchni: przekładki podszynowe, podsypka, wibroizolacja, podtorze – stosuje się dwa parametry: sztywność oraz tłumienie danej warstwy. Sztywność jest liniowa, natomiast tłumienie może być opisane na dwa sposoby:

- jako tłumienie wiskotyczne (gdzie potrzebny jest współczynnik tłumienia wiskotycznego – ten model zalecany jest dla podtorza)
- jako tłumienie strukturalne (histeretyczne) – gdzie pojawia się współczynnik rozpraszania energii opisany powyżej – pkt. 3., ten model jest zalecany dla wkładki antywibracyjnej i podsypki.

W wyniku operowania sztywnościami oraz tłumieniem otrzymuje się dynamiczne sztywności warstw, które składają się z części statycznej oraz tłumiennej – tzn. wybranego typu tłumienia, przy czym można stosować „mieszany” model tłumienia – nie musi on być jednego typu dla wszystkich warstw nawierzchni.

5. Przyjęty model obliczeniowy

W skład modelu obliczeniowego wchodzi:

- a) nawierzchnia porównawcza (referencyjna) – bez elementów wibroizolacyjnych,
- b) nawierzchnia projektowana – z wbudowanymi elementami wibroizolacyjnymi.

Jest to model o jednym stopniu swobody, w którym wykorzystano masę zastępczą składającą się z masy efektywnej nawierzchni oraz masy nieusprężynowanej zestawu kołowego. Założenia są następujące:

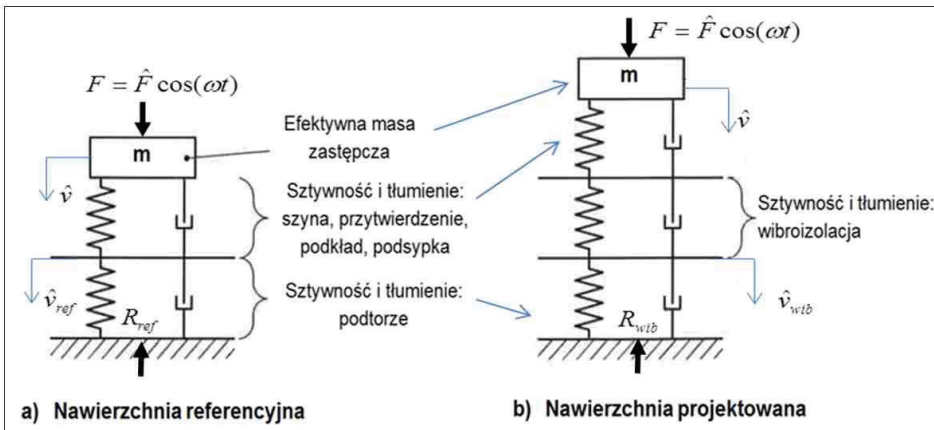
- 1) nawierzchnia jest symetryczna w kierunku poprzecznym, dzięki czemu obliczenia prowadzone są dla połowy toru (z uwzględnieniem 1/2 obciążenia osi),
- 2) oddziaływanie obciążenia jest harmoniczne w średnim zakresie częstotliwości (do około 250Hz),
- 3) materiał są fizycznie nieliniowe,
- 4) funkcja przeniesienia drgań nie zależy od częstotliwości drgań,
- 5) współczynnik rozpraszania energii „lossfactor” nie zależy od częstotliwości drgań.

Model składa się z dwóch układów zastępczych:

- a) **układ górny**: szyna, przytwierdzenie, podkład, podsypka;
- b) **układ dolny**: podtorze.

Pomiędzy tymi układami znajduje się warstwa wibroizolacyjna (nawierzchnia projektowana) lub brak takiej warstwy (nawierzchnia referencyjna).

Sztywności podparcia obu układów oraz samej warstwy wibroizolacyjnej są wyrażone poprzez funkcje zespolone. Zastosowane są modele tłumienia strukturalnego oraz wiskotycznego (tylko dla podtorza) – na rysunku zaznaczono wszędzie „tłoczki”.



Rys. 6. Model wibroizolacji - maty podtłuczniowe. \hat{F} , \hat{v} - amplituda siły wzbudzającej i prędkość drgań, \hat{R}_{ref} , \hat{v}_{ref} - amplituda reakcji podłoża i prędkość drgań podłoża w nawierzchni referencyjnej, \hat{R}_{wib} , \hat{v}_{wib} - amplituda reakcji podłoża i prędkość drgań podłoża w nawierzchni projektowanej po wbudowaniu wibroizolacji

Funkcja przeniesienia drgań w przypadku nawierzchni referencyjnej jest następująca:

$$T_{ref} = \frac{\hat{R}_{ref}}{\hat{F}} = \frac{\hat{k}_{ref}(\omega)}{\hat{k}_{ref}(\omega) - \omega^2 m} \quad (7)$$

gdzie:

\hat{R}_{ref} - zespolona amplituda reakcji,

\hat{F} - amplituda siły wymuszającej (zespolona),

$\hat{k}_{ref}(\omega)$ - sztywność (zespolona) całego układu (dolny i górny razem – jeden nad drugim),

ω - częstość kołowa drgań: $\omega = 2\pi f$,

f [Hz] – częstość drgań.

Sztywność nawierzchni referencyjnej jest następująca:

$$\hat{k}_{ref}(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{\hat{k}_g(\omega)} + \frac{1}{\hat{k}_d(\omega)}} = \frac{\hat{k}_g(\omega) \cdot \hat{k}_d(\omega)}{\hat{k}_g(\omega) + \hat{k}_d(\omega)} \quad (8)$$

gdzie:

$\hat{k}_g(\omega)$ - sztywność zespolona części górnej (przytwierdzenie + podsypka), podkład traktowano jako nieściśliwy,

$\hat{k}_d(\omega)$ - sztywność zespolona części dolnej (podtorze).

Analogicznie w przypadku nawierzchni analizowanej, uzyskujemy funkcję przeniesienia:

$$T_{wib} = \frac{\hat{R}_{wib}}{\hat{F}} = \frac{\hat{k}_{wib}(\omega)}{\hat{k}_{wib}(\omega) - \omega^2 m} \quad (9)$$

gdzie:

\hat{R}_{wib} - amplituda reakcji po wbudowaniu wibroizolacji,

$\hat{k}_{wib}(\omega)$ - sztywność całego układu (dolny i górny razem), po wbudowaniu wibroizolacji i przy założeniu, że wibroizolacja jest bezmasowa.

Sztywność nawierzchni referencyjnej – składa się ze sztywności części górnej:

$$\hat{k}_g(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{\hat{k}_p(\omega)} + \frac{1}{\hat{k}_{pods}(\omega)}} \quad (10)$$

gdzie: $\hat{k}_p(\omega)$ - sztywność dynamiczna przekładki podszynowej, $\frac{1}{\hat{k}_{pods}(\omega)}$ - sztywność dynamiczna podsypki. Obie sztywności wyznaczono poniżej.

Sztywność części dolnej – tj. podtorza (model wiskotyczny):

$$\hat{k}_d(\omega) = k_d + i\omega c_d \quad (11)$$

gdzie: c_d - współczynnik tłumienia wiskotycznego podtorza, k_d - sztywność mechaniczna (sprężyna).

Sztywność całkowita układu z wibroizolacją jest w tym przypadku równa:

$$\hat{k}_{wib}(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{\hat{k}_{ref}(\omega)} + \frac{1}{\hat{k}_{wib}^*(\omega)}} = \frac{\hat{k}_{ref}(\omega) \cdot \hat{k}_{wib}^*(\omega)}{\hat{k}_{ref}(\omega) + \hat{k}_{wib}^*(\omega)} \quad (12)$$

gdzie:

$\hat{k}_{wib}^*(\omega)$ - sztywność zespolona samej wibroizolacji,

$\hat{k}_{ref}(\omega)$ - sztywność zespolona nawierzchni bez wibroizolacji (jak w przypadku (a)).

Sztywność samej wibroizolacji:

$$\hat{k}_{wib}^*(\omega) = k_{wib}^* (1 + i\eta_{wib}) \quad (13)$$

gdzie zastosowano model tłumienia strukturalnego – występuje „lossfactor” wibroizolacji η_{wib} , natomiast k_{wib}^* jest sztywnością wibroizolacji przypadającą na pojedynczy węzeł przytwierdzenia.

6. Sztywność przytwierdzenia

Współczynnik rozpraszania energii („lossfactor”) określony jest w modelu histeretycznym poprzez stosunek części urojonej k_{Im} do części rzeczywistej k_{Re} :

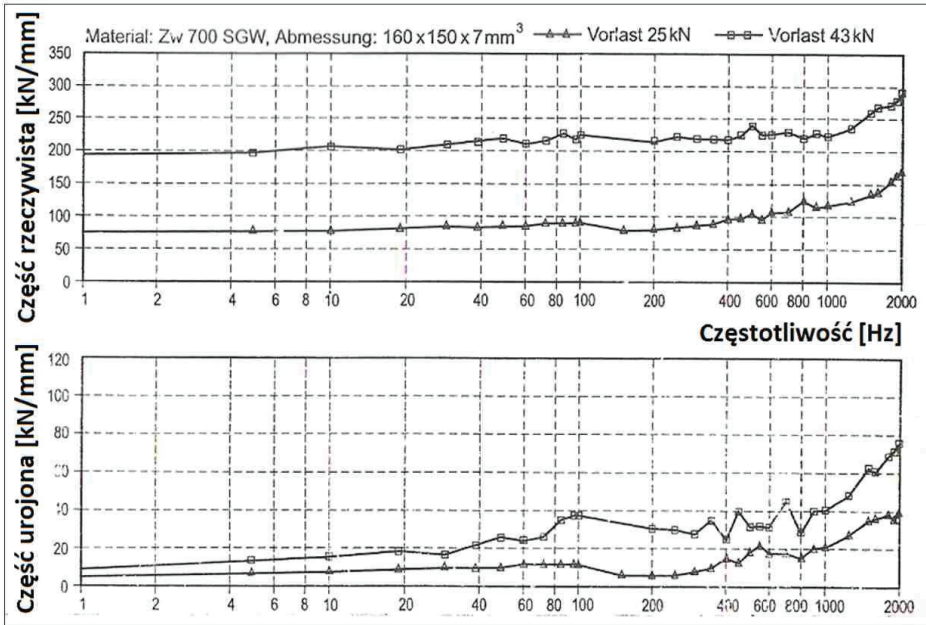
$$\eta_p = \frac{k_{Im}}{k_{Re}}, \quad (14)$$

natomiast sztywność dynamiczna przekładki dana jest jako:

$$\hat{k}_p(\omega) = k_{stat} (1 + i\eta_p) \quad (15)$$

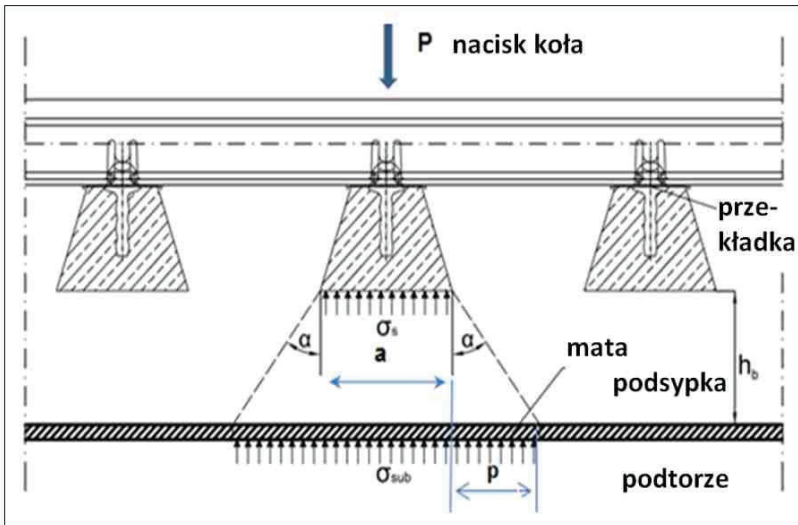
gdzie: k_{stat} - jest sztywnością statyczną. Tak określona sztywność przekładki będzie częścią sztywności nawierzchni znajdującą się ponad wibroizolacją $\hat{k}_g(\omega)$.

Sztywności dynamiczne przekładek podszytowych wyznaczało wielu autorów. Przykładowo – rys. 7.



Rys. 7. Wyznaczanie sztywności dynamicznej przekładki podszykowej Zw700SGW w funkcji częstotliwości wymuszenia [9], obciążenie wstępne 25 kN oraz 43 kN

7. Sztywność podsypki



Rys. 8. Wyznaczanie sztywności maty podtłuczniowej: α - kąt tarcia wewnętrznego podsypki (równy kątowi rozkładu naprężeń w podsypce)

Sztywność statyczna podsypki może być wyznaczona z wykorzystaniem wzoru Ahlbecka [1] (por. rys. 8) jako:

$$k_{stat}^{pods} = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot \left(\frac{1}{2} l_p - a \right) \cdot E_{pods}}{\ln \left[\frac{\frac{1}{2} l_p}{a} \cdot \frac{(a + 2 \operatorname{tg} \alpha \cdot h_b)}{\left(\frac{1}{2} l_p + 2 \operatorname{tg} \alpha \cdot h_b \right)} \right]} \quad (16)$$

gdzie: l_p - długość podkładu oraz pozostałe oznaczenia podano na rys. 8.

Sztywność dynamiczna podsypki będzie określona jako:

$$\hat{k}_{pods}(\omega) = k_{stat}^{pods} (1 + i \eta_{pods}) \quad (17)$$

gdzie: η_{pods} - współczynnik rozpraszania energii dla podsypki.

Przy założeniu, że drgania odbywają się w tej samej fazie można zastosować wzór na składnie szeregowo sztywności przekładki i podsypki. Obydwie sztywności będą wchodziły zatem w skład sztywności części górnej. Równocześnie założono, że podkład jest nieściśliwy.

8. Sztywność maty przypadająca na pojedynczy węzeł przytwierdzenia

Sztywność maty na jeden węzeł mocowania wyznaczona jest w zależności od kąta tarcia wewnętrznego podsypki (α) oraz od grubości warstwy podsypki (h_b) - rys. 8:

$$k_{wib}^* = c_{stat} A_{maty} \quad (18)$$

gdzie:

c_{stat} - statyczny moduł ścieżny maty z badań laboratoryjnych,

A_{maty} - powierzchnia maty przypadająca na jeden węzeł przytwierdzenia, wyznaczona jako:

$$A_{maty} = (a + 2h_b \operatorname{tg} \alpha) \cdot \left(\frac{l_p}{2} + h_b \operatorname{tg} \alpha \right) \quad (19)$$

gdzie:

α, a, h_b podano na rys. 8,

l_p - długość podkładu.

Jak widać na rys. 8, kąt tarcia wewnętrznej podsypki wpływa na sztywność maty określoną dla pojedynczego węzła, stąd będzie także rzutował na sztywność całego układu oraz na predykcję efektywności wibroizolacji. Ponadto, od tego kąta będzie zależała także objętość podsypki oraz konsekwentnie jej masa. Masa ta będzie także wpływała na obliczoną efektywność wibroizolacji.

W badaniach wartości kąta tarcia wewnętrznej wykorzystuje się dwie techniki:

- a) pomiar siły ścinającej (tj. naprężenia ścinającego) próbki podsypki poddanej ścisaniu, następnie z teorii Koulomba-Mohra wyznacza się pochylenie obwiedni w układzie naprężenie ścinające-naprężenie normalne,
- b) pomiar naprężeń faktycznie występujących na podłożu pod tłuczniem obciążonym podkładem lub fragmentem rusztu torowego w laboratorium – tak uzyskany „odcisk” naprężeń na podłożu służy do wyznaczenia efektywnego kąta tarcia wewnętrznej [13].

W zależności od metody uzyskuje się następujące kąty tarcia wewnętrznej; a) 35-45°, b) 17-20°. Ta druga metoda jest bardziej wiarygodna, gdyż uwzględnia rzeczywistą pracę podsypki pod podkładem (mierzone są przecież naprężenia na podłożu). *Nota bene* w Eurokodzie mostowym EN 1991-2:2003 [14], kąt ten przyjmuje się równy 15°. W obliczeniach poniżej przyjmowano kąt tarcia wewnętrznej, utożsamiony z kątem rozkładu naprężeń, w zakresie 15-45°.

9. Tłumienie dodane

Ostatecznie, biorąc pod uwagę (6), tłumienie dodane jest obliczane jako:

$$IL = 20 \log \left| \frac{\hat{k}_{ref}(\omega)}{\hat{k}_{ref}(\omega) - \omega^2 m} \cdot \frac{\hat{k}_{wib}(\omega) - \omega^2 m}{\hat{k}_{wib}(\omega)} \right| \text{dB} \quad (20)$$

Obliczenie tłumienia dodanego polega teraz na wyznaczeniu logarytmudzielnego z modułu stosunków zespolonych funkcji przeniesienia drgań układu referencyjnego nawierzchnia-podtorze do układu z wbudowaną wibroizolacją. Wyprowadzenie to jest bardzo długie i będzie pominięte.

10. Przykłady obliczeń

Obliczenia wykonano dla szyny 60E1, przekładki podszynowej PKW 60 (przywiercenie SB) o sztywności statycznej $k_{stat} = 60 \text{ kN/mm}$ i współczynniku rozpraszania energii $\eta_p = 0.1$ (dla celów porównawczych przyjęto także $k_{stat} = 600 \text{ kN/mm}$), podkładów PS-94, podsypki o grubości $h_b = 35 \text{ cm}$, sztywności obliczonej dla modułów Younga $E_{pods} = 180\text{-}360 \text{ MPa}$, współczynnika rozpraszania energii

$\eta_{pods} = 0.4$. Współczynnik podłoża (C) przyjęto w zakresie 0.05-0.15 N/mm³. Sztywność podtorza jest zatem obliczona jako

$$k_d = C \cdot A_{maty} \quad (21)$$

gdzie: powierzchnia podtorza przypadająca na jeden węzeł przytwierdzenia jest taka sama jak dla maty (A_{maty}). Współczynnik tłumienia wiskotycznego podłoża (C_d) przyjęto tak jak w normie DIN V 45673-4: 2008, na poziomie 1.2×10^6 Ns/m.

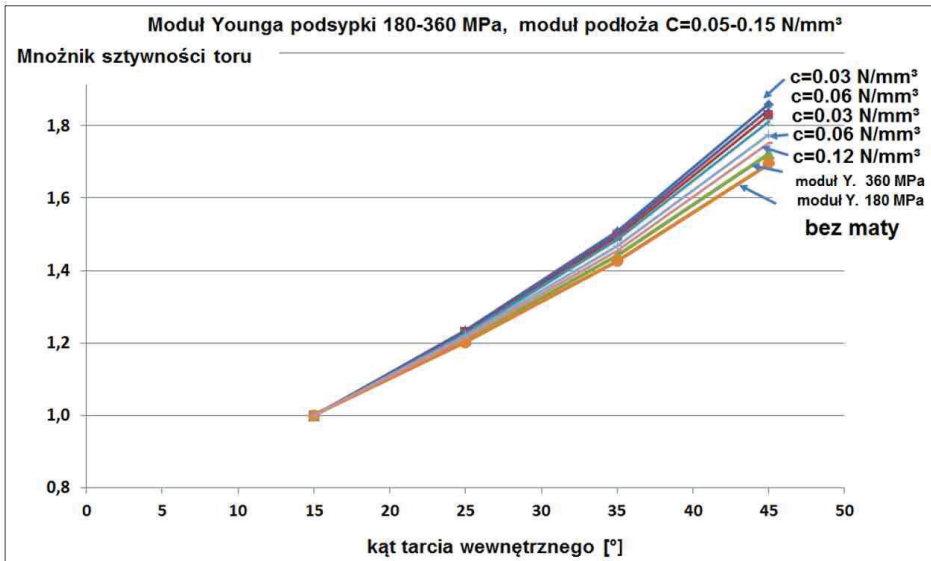
Masa efektywna składa się 1/2 masy zestawu kołowego oraz szyny wraz z podsypką – przyjęto $m = 3870$ kg (co odpowiada naciskowi statycznemu osi 225 kN), dla kąta 17° oraz 4600 kg dla kąta 45°.

Tabela 1. Sztywność mat podtłuczniowych

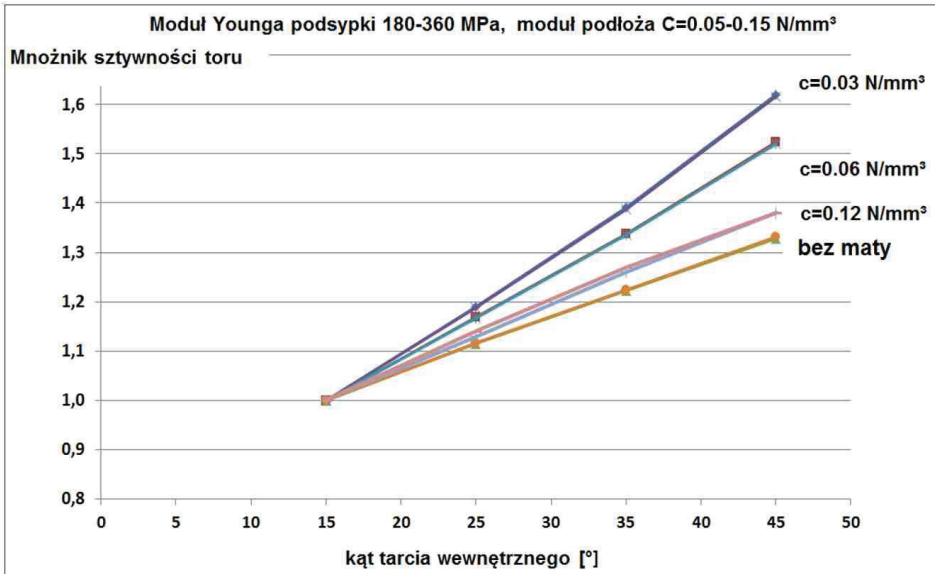
Typ maty	Moduł statyczny maty (zgodnie z UIC) [N/mm ³]	Współczynnik rozpraszania energii $\eta[-]$ (*)
Mata 1	0.03	0.30
Mata 2	0.06	
Mata 3	0.12	

(*) dla celów porównawczych przyjęto taki sam dla analizowanych mat

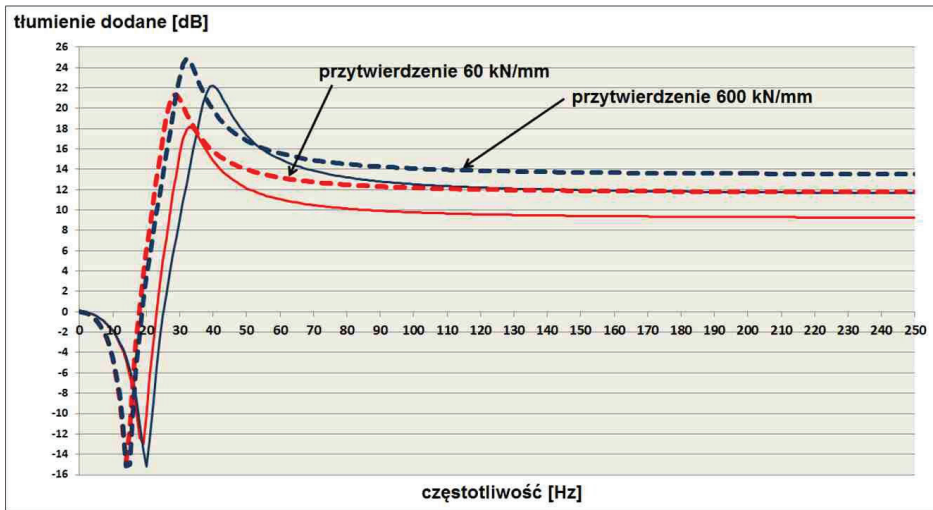
Poniżej przedstawiono obliczenia wpływu kąta tarcia wewnętrznego na sztywność statyczną układu nawierzchnia-podtorze (rys. 9,10) oraz odpowiadające im tłumienie dodane (rys 1).



Rys. 9. Wpływ kąta tarcia wewnętrznego na całkowitą sztywność nawierzchni i podtorza z elementami wibroizolacyjnymi i bez, sztywność statyczna przekładki podszynowej 600 kN/mm



Rys. 10. Wpływ kąta tarcia wewnętrzne na całkowitą sztywność nawierzchni i podtorza z elementami wibroizolacyjnymi i bez, sztywność statyczna przekładki podszytowej 60 kN/mm



Rys. 11. Wpływ kąta tarcia wewnętrzne na tłumienie dodane: linie przerywane dla kąta $\alpha = 17^\circ$, linie ciągłe dla kąta $\alpha = 45^\circ$, dwa przypadki sztywności przytwierdzenia 60 kN/mm oraz 600 kN/mm, sztywność podłoża $C = 0.15 \text{ N/mm}^3$, sztywność maty podtluczniowej wynosiła 0.06 N/mm^3

11. Wnioski

Z uwagi na szeroki zakres zagadnienia, w referacie przedstawiono jedynie zarys możliwych analiz pracy toru. Pokazano wpływ kąta tarcia wewnętrznego na ugięcie szyny oraz na prognozę tłumienia dodanego. Wykazano konieczność kompleksowej analizy pracy toru. W szczególności stwierdzono:

- przyjęcie kąta tarcia wewnętrznego równego 45° powoduje pozorny wzrost sztywności układu-nawierzchnia-podtorze o około 80% w przypadku przytwierdzeń bardzo sztywnych (600 kN/mm) oraz o około 45% w przypadku przytwierdzenia o sztywności 60 kN/mm (jak SB) w stosunku do nawierzchni z kątem równym 15° ,
- pozorny wzrost sztywności jest tym większy im bardziej podatne maty są porównywane (w przykładzie obliczeniowym najniższy moduł maty wynosił 0.03 N/mm^3 , dla którego wzrost sztywności wynosił ponad prawie 90% oraz ponad 60% dla w/w przytwierdzeń),
- obliczone tłumienie dodane nieco maleje w przypadku większych kątów tarcia wewnętrznego, tj. pozornie sztywniejszych mat (przy ustalonym poziomie współczynników rozpraszania energii), różnica wynosi ok. 1-2 dB i jest tym większa im sztywność całego układu jest większa,
- przyjmowanie zbyt dużego kąta tarcia wewnętrznego zaniża prognozę ugięcie szyny z poziomu ok. 2.3-2.7 mm (zbyt duże ugięcia) do poziomu 1.3-1.5 mm przy przytwierdzeniach 600 kN/mm oraz z poziomu ok. 2.7-3.2 mm (zbyt duże ugięcia) do poziomu 1.5-1.8 mm przy przytwierdzeniach 60 kN/mm oraz przy takich samych matach podtłuczniowych.

Na podstawie wniosków szczegółowych można sformułować wniosek ogólny o konieczności przyjęcia określonych parametrów nawierzchni (np. kąt tarcia wewnętrznego, masy) przez analogię do Eurokodu EN 1991-2:2003 [14], tak aby stworzyć jednakowe warunki dla różnych prognoz efektywności wibroizolacji nawierzchni kolejowych. Szczegółowe wymagania odnośnie wykonywania takich prognoz w powiązaniu z pracą toru powinny być sformułowane w przepisach PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

Bibliografia

- [1] Ahlbeck D.R., Meachan H.C., Prause R.H., The development of analytical models for railroad track dynamics, in Kerr. A.D. (ed.) Railroad track mechanics and technology, Princeton University, New Jersey, 1975.
- [2] L. Auersch, S Said et al., The dynamic behaviour of railway tracks with under sleeper pads, finite-element boundary-element model calculations, laboratory tests and field measurements. EUROODYN 2014, Porto, Portugal 30 June-2 July 2014.

- [3] DBS 918 071–01, Unterschottermatten zur Minderung der Schotterbeanspruchung, 2006.
- [4] DB Netze Richtlinie 820, Grundlagen des Oberbaues, 2013.
- [5] DB Richtlinie 836.4106, Übergänge zwischen Erd- und Kunstbauwerken, 2014.
- [6] DIN V 45673-4, Mechanische Schwingungen – Elastische Elemente des Oberbaus von Scheinbahnwegen – Teil 4, 2008.
- [7] DIN 45673-5, Mechanical vibration – resilient elements used in railway tracks, Part 5: laboratory test procedures for under-ballast mats, 2010.
- [8] Karta UIC 719-1R, Recommendations for the use of Under Ballast Mats, 2011.
- [9] K. Knothe, Gleisdynamik, 2001, TU-Berlin, Ernst und Sohn Berlin.
- [10] Müller-Boruttau, Zur Dimensionierung Elastischer Elemente des Oberbaus, IMB Dynamik, 2010.
- [11] ÖBB Richtlinie B50-1, 2010.
- [12] R.G. Wettschurek et al., Noise and vibration from railroad traffic, w Müller G., Möser M., Handbook of Engineering Acoustics. Springer, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2013.
- [13] Steiner E., Kuttelwascher C., Prager G., Druckausbreitung von belasteten Eisenbahnschwellen im verschmutzten Gleisschotter. ETR Austria, Juni 2014.
- [14] PN-EN 1991-2:2003, Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia, ruchome, mostów.

