

PROBLEMY MODELOWANIA TZW. „TLUMIENIA DODANEGO” NAWIERZCHNI SZYNOWYCH W ŚWIETLE NORM EUROPEJSKICH¹

Juliusz SOŁKOWSKI

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

W referacie przedstawiono przegląd problemów związanych z modelowaniem oraz badaniami doświadczalnymi efektywności wibroizolacji w nawierzchniach kolejowych. Uwzględniono szereg norm laboratoryjnych oraz zaleceń i przepisów kolejowych kolei europejskich. Wskazano czynniki mające wpływ na modelowanie wibroizolacyjności nawierzchni kolejowych oraz podano miary stosowane w normatywach. Zwrócono uwagę na niedostatki polskich przepisów PKP PLK S.A. w zakresie zarówno teoretycznym jak i praktycznym dotyczącym wymagań dla elementów sprężystych, które są stosowane coraz częściej na naszych liniach kolejowych.

Słowa kluczowe: nawierzchnie podsypkowe, nawierzchnie bezpodsypkowe, elementy sprężyste, wibroizolacja, normatywy

1. WSTĘP – CEL PRACY

Celem niniejszego referatu 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 elementami sprężystymi. Elementy sprężyste stosowane przez wiodące koleje europejskie są klasyfikowane w dwóch grupach [12, 25]. Pierwsza grupa to elementy, których główną funkcją jest wibroizolacja [13,14], druga grupa to elementy mające funkcję ochronną dla podsypki oraz innych komponentów nawierzchni, które także kształtują sprężystość nawierzchni (np. w strefach przejściowych) [6,7,8].

W referacie poruszone są jedynie zagadnienia pomiarów przytorowych oraz modelowania samej nawierzchni z wbudowanymi elementami sprężystymi. Nie rozpatrywane są zagadnienia całościowej oceny inwestycji na otoczenie z punktu widzenia przenoszenia drgań. Jest to bardzo szeroka problematyka, która jest z powodzeniem rozwijana w naszym kraju – przykładowo w pracach [21,22,23]. Autor niniejszego artykułu pragnie jedynie poruszyć problemy związane z wibroizolacyjnością „u źródła” i to jedynie w odniesieniu do toru kolejowego.

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.25.28

W Polsce stosowane są programy do obliczeń efektywności wibroizolacji (tzw. „tłumienia dodanego”) przez firmy dostarczające materiały sprężyste do nawierzchni szynowych. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę, czy oprócz prognoz wibroizolacyjności prezentowane są informacje dotyczące zachowania całego toru, takie jak: ugięcia statyczne, ugięcia dynamiczne szyn oraz innych elementów, współczynniki usztywnienia dynamicznego całej nawierzchni, siły koło-szyna czy rozkłady naprężeń w poszczególnych elementach nawierzchni, itp. Jest to bardzo istotne, gdyż jedynie całościowa ocena pracy toru może być podstawą do podjęcia decyzji o sensowności stosowania elementów sprężystych.

Bardzo istotną kwestią jest też stosowana metoda obliczenia efektywności wibroizolacyjności. Być może nie jest powszechnie znany fakt, że efektywność wibroizolacyjności może być podawana z zastosowaniem kilku miar [10], o których więcej w dalszym ciągu artykułu oraz – co bardzo istotne – efektywność wibroizolacyjności jest funkcją relatywną, tzn. wyrażana jest zawsze w stosunku do pewnej nawierzchni, która traktowana jest jako referencyjna. Wybór nawierzchni referencyjnej ma zatem kluczowe znaczenie dla prognoz, które mogą być czasem zawyżone, jeżeli nawierzchnia referencyjna będzie posiadała „słabe” parametry. W tym kontekście należy także pamiętać, że nawierzchnią referencyjną może być dowolna nawierzchnia (zarówno podsypkowa jak i bezpodsypkowa), bez względu na typ aktualnie projektowanej nawierzchni. Nie musi to być ten sam typ nawierzchni, ale bez elementów sprężystych. Podkreśla to wyraźnie norma [9]. W naszym kraju prognozy wibroizolacyjności przeprowadza się – na ogół – dla tego samego typu nawierzchni (tzn. projektowana oraz referencyjna są tego samego typu), co jest zawężeniem w stosunku do wspomnianej normy i praktyki europejskiej.

Zdaniem autora istnieje pilna potrzeba wprowadzenia odpowiednich przepisów na liniach PKP PLK S.A. w zakresie parametrów nawierzchni szynowych, elementów sprężystych oraz ich obszarów zastosowania.

2. MODELOWANIE NAWIERZCHNI SZYNOWYCH

Mówiąc ogólnie o modelowaniu nawierzchni szynowych, najczęściej analizowane są następujące zakresy częstotliwości [20]:

- niska częstotliwość – do 50 Hz (np. w wyniku nierówności szyn, niejednorodności podłoża szyny, dyskretnego podparcia podkładami, ruchu wężykowego),
- średnia częstotliwość – 50-500 Hz (wynikająca np. z nierówności i uszkodzeń powierzchni kontaktu koło-szyna),
- wysoka częstotliwość – powyżej 500 Hz (dotyczy np. generowania hałasu przez elementy mechaniczne w układzie pojazd-nawierzchnia, zużycie faliste szyny).

W literaturze i w normatywach dotyczących badań, drgania analizowane są przeważnie w zakresie od kilku Hz do 250Hz (jak w [9] – normy dot. modelowania „tłumienia dodanego” lub do 315Hz ([10] – normy dotyczące pomiarów drgań). Na ogół nie obejmują one częstotliwości powyżej 500Hz.

Stosowane modele toru to modele ciągłe lub dyskretno-ciągłe [1,2,3,4]. Modele ciągłe dają miarodajne wyniki dla częstotliwości niskich i średnich. Datują się głównie od prac Timoszenki (lata 20-te XXw.) który analizował najpierw nieskończone belki Bernoulliego-Eulera na podłożu Winklera pod obciążeniem statycznym i dynamicznym, a następnie wprowadził swój model belki. Stosowane są rozwiązania analityczne lub przy pomocy Metody Elementów Skończonych. Poza kryterium podparcia mogą być jeszcze inne podziały modeli, biorące pod uwagę takie elementy jak: rodzaj obciążenia (siły lub masy skupione, stałe i zmienne w czasie, przemieszczające się lub nieprzemieszczające się). Prace przeglądowe dotyczące modeli toru to przykładowo [24]. Modele toru mogą być analizowane w dziedzinie:

- częstotliwości – tylko dla przypadków liniowych,
- czasu.

Analiza liniowa jest także wykorzystywana przy badaniach doświadczalnych elementów sprężystych – tzn. zakłada się niezależność parametrów tłumienia elementu (tzw. „loss factor”) od częstotliwości [11]. Zatem w wielu praktycznych przypadkach można stosować modele liniowe [5], tym bardziej, że brakuje danych dla modeli nieliniowych.

Jeśli chodzi o modelowanie tłumienia, wykorzystywane są dwa podejścia: tzw. tłumienie wiskotyczne oraz tłumienie strukturalne (histeretyczne) [9]. Z reguły model tłumienia wiskotycznego stosowany jest do przekładek podszytowych oraz gruntu podtorza, natomiast model histeretyczny wykorzystywany jest do podsypki. Tłumienie wpływa na zmianę sztywności rozważanego elementu. W przypadku tłumienia histeretycznego mamy [9]:

$$\hat{k}_{el}(\omega) = k_{el}(1 + i\eta_{el}(\omega)), \quad (1)$$

gdzie:

$\hat{k}_{el}(\omega)$ – sztywność zespolona elementu, zależna od częstotliwości obciążenia ω ,

k_{el} – sztywność statyczna rozważanego elementu,

$\eta_{el}(\omega)$ – współczynnik rozpraszania energii („loss factor”) danego elementu, może także zależeć (np. liniowo) od częstotliwości obciążenia ω ,

i – jednostka urojona.

W przypadku modelu wiskotycznego mamy [9]:

$$\hat{k}_{el}(\omega) = k_{el} + i \cdot 2\pi \cdot \omega c_{el}(\omega), \quad (2)$$

gdzie:

$\hat{k}_{el}(\omega)$ – sztywność zespolona elementu, zależna od częstotliwości obciążenia ω ,

k_{el} – sztywność statyczna elementu (sprężyna),

$c_{el}(\omega)$ – współczynnik tłumienia wiskotycznego elementu, jeżeli zależy od częstotliwości drgań, najczęściej $c_{el} = const$,

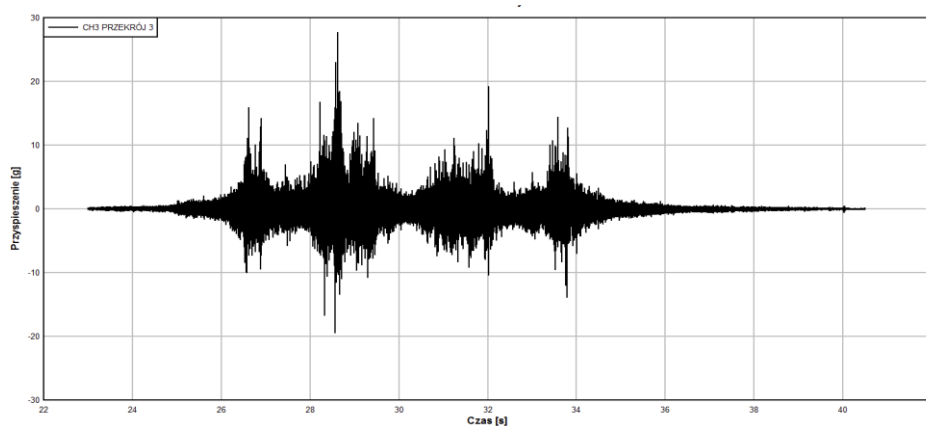
i – jednostka urojona.

W większości przypadków modele są deterministyczne lecz są także stosowane stochastyczne do opisu globalnych własności podsypki i ich zmienności na długości toru. Jaki model ma być zastosowany w konkretnym przypadku zależy od wyboru badacza – przy czym obowiązuje zasada formułowania modeli jak najprostszych ale odpowiednio dokładnych („uszytych na miarę”).

Podłoże modelowane jest najczęściej – mimo, że jest to najstarsze ujęcie – jako Winklera bez luk pod podkładami z tłumieniem wiskotycznym lub innymi założeniami [17,18], albo też jako półprzestrzeń sprężysta [19]. Wykonuje się także obliczenia porównawcze z wykorzystaniem różnych modeli. W pracy [26] porównywano model belkowy na podłożu Winklera z modelem belkowym na półprzestrzeni sprężystej stwierdzając dobrą zgodność wyników i wystarczalność podłoża Winklera w analizie wielu zagadnień.

3. MIARY WIBROIZOLACYJNOŚCI NAWIERZCHNI

Podstawą do oceny wibroizolacyjności nawierzchni (w tym przypadku) kolejowej jest zarejestrowany przebieg czasowy impulsu, którym może być prędkość drgań $v(t)$ lub przyspieszenie drgań $a(t)$. Sposób rozmieszczenia czujników jest precyzyjnie opisany w normie [10 Teil 1]. W przypadku nawierzchni na tzw. torze otwartym (poza tunelem czy innym obiektem inżynierskim), najbliższy punkt pomiarowy jest usytuowany w gruncie w odległości 8 m od osi toru. Następne mogą znajdować się w odległości 16 m, 32 m, 64 m, nawet 128 m.



Rys. 1. Przykładowy przebieg czasowy przyspieszeń drgań [27]

Na podstawie zarejestrowanego rzeczywistego sygnału (np. rys. 1) wyznacza się tzw. wartości skuteczne sygnału, które mogą być określone w postaci „niewygładzonej” oraz „wygładzonej” (najczęściej). Stosowana jest następująca transformacja [10]:

$$\bar{v}_F(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\xi=0}^t e^{-\frac{t-\xi}{\tau}} v^2(\xi) d\xi}, \quad (3)$$

gdzie:

ξ – bieżąca współrzędna czasowa,

t – współrzędna czasowa sygnału zarejestrowanego,

τ – stała czasowa całkowania, która może wynosić 0.125 ms (najczęściej) aż do 1 ms.

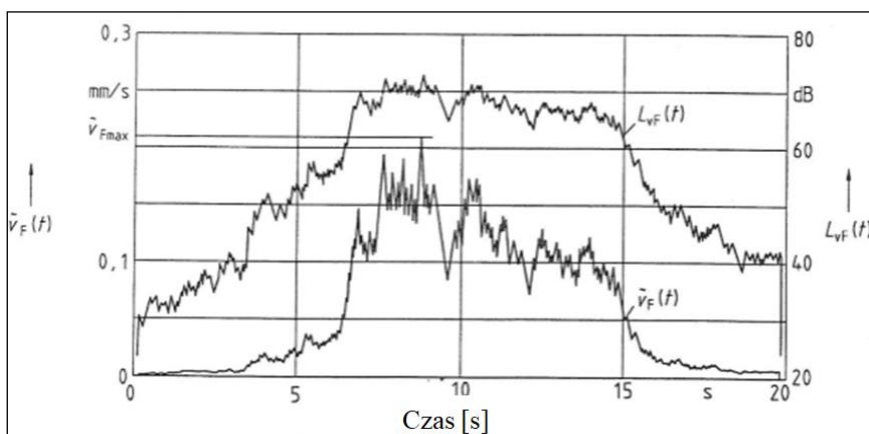
Wyznaczona w ten sposób wartość skuteczna prędkości $\bar{v}_F(t)$ może też być zastąpiona przez analogicznie wyznaczoną wartość skuteczną przyspieszenia $\bar{a}_F(t)$. Sygnał jest następnie przedstawiony w postaci wartości skutecznej (wprost) lub w postaci logarytmicznej, gdzie konieczna jest pewna wartość referencyjna – najczęściej stosowana wartość to $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} m/s$ według wzoru określającego tzw. poziom prędkości drgań – rysunek 2 [10]:

$$L_{v_F}(t) = 20 \log \frac{\bar{v}_F(t)}{v_0} \text{ [dB]}, \quad (4)$$

gdzie:

v_0 – wspomniana wartość referencyjna.

Analogicznie określa się poziom przyspieszeń.



Rys. 2. Reprezentacja zmierzonego przebiegu czasowego prędkości drgań: wartość skuteczna oraz poziom prędkości drgań $L_{v_F}(t)$ [10]

Najczęściej stosuje się reprezentację wartości skutecznej poziomu drgań w podziale na tercje, wtedy w liczniku pod logarytmem pojawiają się wartości skuteczne w poszczególnych tercjach $\tilde{v}_F(\omega_{Tn})$, mianowicie [10]:

$$L_{vF}(\omega_{Tn}) = 20 \log \frac{\tilde{v}_F(\omega_{Tn})}{v_0} \text{ [dB]}, \quad (5)$$

Do oceny wibroizolacyjności układu stosowane są następujące miary:

a) tłumienie dodane – jako różnica poziomów drgań (prędkości lub przyspieszenia) pomiędzy dwoma układami: projektowanym $L_{F'proj}(\omega_{Tn})$ oraz referencyjnym $L_{vF'ref}(\omega_{Tn})$ [10]:

– prędkości (v):

$$D_{e'v} = L_{vF'ref}(\omega_{Tn}) - L_{vF'proj}(\omega_{Tn}) \quad (6a)$$

– przyspieszenia (a):

$$D_{e'a} = L_{aF'ref}(\omega_{Tn}) - L_{aF'proj}(\omega_{Tn}) \quad (6b)$$

Układem referencyjnym może być dowolny układ, tzn. nawierzchnia podsykowa lub bezpodsykowa niezależnie od tego jaki typ nawierzchni projektowanej analizujemy. Wyraźnie potwierdza to norma [9].

b) różnica pomiędzy widmami tercjowymi wartości skutecznych prędkości lub przyspieszeń:

– prędkości (v):

$$D_v(\omega_{Tn}) = \tilde{v}_{F'ref}(\omega_{Tn}) - \tilde{v}_{F'proj}(\omega_{Tn}) \quad (7a)$$

– przyspieszenia (a):

$$D_a(\omega_{Tn}) = \tilde{a}_{F'ref}(\omega_{Tn}) - \tilde{a}_{F'proj}(\omega_{Tn}) \quad (7b)$$

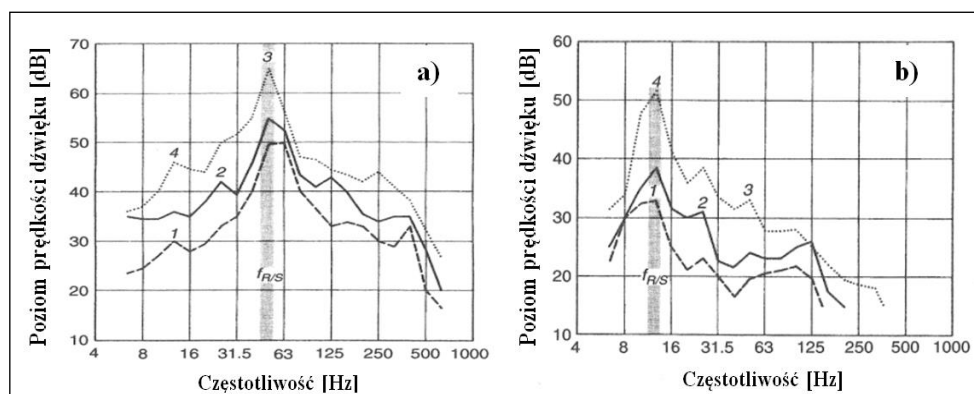
c) suma poziomów drgań wartości skutecznych w N tercjach:

$$\Sigma L = 10 \log \sum_{n=1}^N 10^{0.1 \cdot L(\omega_{Tn})} \text{ [dB]} \quad (8)$$

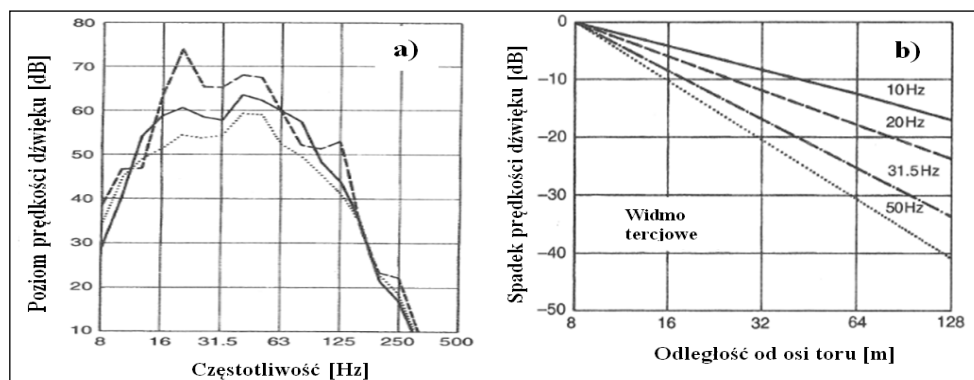
gdzie sumowanie może dotyczyć widma tercjowego prędkości lub przyspieszeń – ogólnie $L(\omega_{Tn})$.

Z powyższego, wynika wyraźnie, że jeśli chodzi o skuteczność wibroizolacyjności, oceniany jest cały układ nawierzchni, nie tylko jeden element wbudowany w nawierzchnię (np. mata podtłuczniowa). Konsekwentnie, podobna zasada dotyczy

modelowania wibroizolacyjności – por. rozdział poniżej. Przykłady rzeczywistych pomiarów podano na rysunkach 3–4. Obrazują one wpływ typu nawierzchni, typu pociągu i jego prędkości na wielkości pomierzonej efektywności wibroizolacyjności nawierzchni.



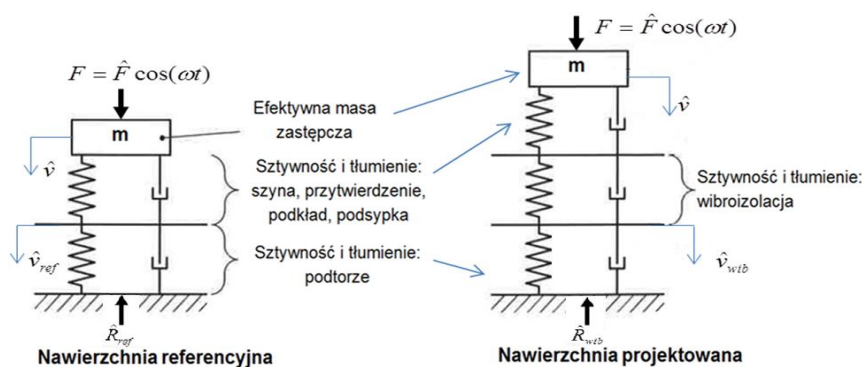
Rys. 3. Pomiary poziomu prędkości drgań przy różnych prędkościach pociągu ET 420: 1) $v=30\text{km/h}$, 2) $v=60\text{km/h}$, 3) $v=120\text{km/h}$ dla nawierzchni podsypkowej (a) i bezpodsypkowej (b), $f_{R/S}$ – częstotliwość drgań własnych nawierzchni [15]



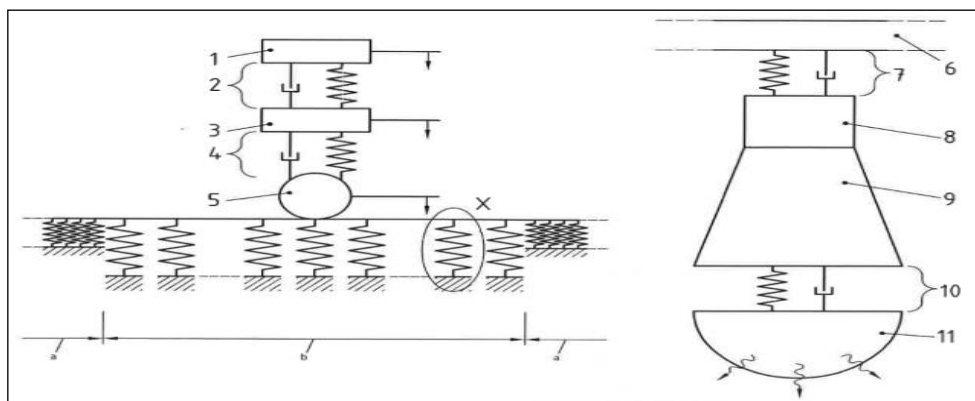
Rys. 4. (a) Pomiary poziomu prędkości drgań przy różnych prędkościach pociągu oraz zależności od jego typu: „...” pociąg towarowy $v=100\text{km/h}$, „—” InterRegio $v=160\text{km/h}$, „- - -” ICE $v=250\text{km/h}$ dla nawierzchni podsypkowej, (b) zanikanie drgań w funkcji odległości od osi toru w zależności od częstotliwości pasma [15]

4. ZALECENIA NORMY [9] DOTYCZĄCE PROGNOZOWANIA „TŁUMIENIA DODANEGO”

Zgodnie z cytowaną normą mogą być stosowane dowolne modele wibroizolacyjności: od analitycznych (o jednym czy o wielu stopniach swobody) do modeli numerycznych. Przykładowe modele pokazano na rysunku 5 oraz rysunku 6.



Rys. 5. Przykład modelu o jednym stopniu swobody [9]



Rys. 6. Przykład modelu numerycznego [9,13], 1-masa wagonu, 2- zawieszenie 2-go stopnia, 3- masa wózka, 4- zawieszenie 1-go stopnia, 5-masa zestawu kołowego, 6- szyna (Belka Timoszenki), 7- przekładka podszynowa, 8-podkład, 9-podsypka, 10-mata podtłuczniowa, 11-podtorze (półprzestrzeń sprężysta)

Przy modelowaniu tzw. „tłumienia dodanego” wyznaczana jest tzw. funkcja odpowiedzi podłoża znajdującego się pod nawierzchnią – reakcja podłoża, prędkości drgań lub przyspieszenia drgań, wg wzorów poniżej, wykorzystując funkcję przeniesienia drgań [9]:

$$T_{proj} = \frac{\hat{R}_{proj}}{\hat{F}} \text{ oraz } T_{ref} = \frac{\hat{R}_{ref}}{\hat{F}}, \quad (9)$$

gdzie:

- \hat{R}_{ref} – zespolona amplituda reakcji podłoża dla referencyjnego układu,
- \hat{R}_{proj} – zespolona amplituda reakcji podłoża dla projektowanego układu,
- \hat{F} – siła wymuszająca (zespolona).

W przypadku modeli analitycznych o jednym czy o wielu stopniach swobody, w przypadku modeli ciągłych czy skupionych (jednowymiarowych) przyjmuje się zwykle, że wymuszenie siłą drgającą (\hat{F}) jest takie samo dla układu projektowanego jak dla układu referencyjnego. Założenie to powoduje, że biorąc definicję tłumienia dodanego jako różnicę poziomów drgań, oraz korzystając z własności odejmowania logarytmów uzyskuje się pod logarytmem następujący iloraz:

$$D_e = 20 \log \left| \frac{\hat{R}_{ref}}{\hat{F}} \right| - 20 \log \left| \frac{\hat{R}_{proj}}{\hat{F}} \right| = 20 \log \left| \frac{\hat{R}_{ref}}{\hat{R}_{proj}} \right| \text{ [dB]} \quad (10)$$

Wartość dodatnia D_e oznacza oczekiwany efekt zmniejszenia przeniesienia drgań (tłumienia układu).

W przypadku modelu numerycznego, jak zaleca norma [9] należy wybrać punkt (lub punkty) porównawcze dla nawierzchni projektowanej oraz nawierzchni referencyjnej w których określone zostaną oddziaływania (prędkości, przyspieszenia). Może to nastroczać pewien problem, gdyż układy nawierzchni mogą mieć różną konstrukcję, zatem powstaje pytanie który punkt (lub punkty) pod nawierzchnią są reprezentatywne.

5. PODSUMOWANIE

Na prognozy „tłumienia dodanego” mają wpływ wszystkie parametry nawierzchni szynowych:

- sztywność i tłumienie przekładki podszykowej,
- masa oraz sztywność podkładów,
- sztywność podsypki, jej masa (stopień zagęszczenia oraz grubość warstwy podsypki, kąt tarcia wewnętrznego przyjmowany do obliczeń, który wpływa zarówno na obliczoną sztywność przyzmy podsypki pod podkładem jak i jej masę), współczynnik tłumienia podsypki tzw. „loss factor” w zalecanym modelu tłumienia hysteretycznego, ciekawy sposób pomiaru kąta pod którym naprężenia rozchodzą się w podsypce podano w [16],
- sztywność górnej warstwy podtorza,
- częstotliwości drgań własnych całej nawierzchni i jej elementów.

Należy wziąć pod uwagę, że konkretne sztywności dynamiczne elementów nawierzchni zależą od prędkości poruszającego się pociągu. Wynika to z faktu usztywnienia elementów nawierzchni w wyniku obciążenia przykładanego szybko. W prognozach wibroizolacyjności należy zatem także brać pod uwagę prędkości pojazdów oraz ich typ – tzn. rozkład nacisków osiowych oraz mas drgających pociągu.

Definicje tłumienia dodanego oraz innych miar efektywności wibroizolacji dają możliwość porównywania każdej nawierzchni z każdą, w tym nawierzchni podsypkowych oraz bezpodsypkowych. Jest to szczególnie ważne gdyż w naszym kraju stosowane są coraz bardziej zróżnicowane typy nawierzchni i często pojawia się pytanie o ich zdolność do redukcji drgań propagowanych do otoczenia – która jest najlepsza?

Problemem praktycznym jest brak ścisłych wytycznych do modelowania nawierzchni oraz przyjmowania ich parametrów – przykładowo sztywności i masy podsypki. Zdaniem autora problem ten powinien być uregulowany przez PKP PLK S.A. wraz z wprowadzaniem odpowiednich przepisów dotyczących projektowania oraz warunków dostawy elementów sprzężystych dla nawierzchni przez producentów.

LITERATURA

- [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] Auersch L., Said S. et al. „The dynamic behaviour of railway tracks with under sleeper pads, finite-element boundary-element model calculations, laboratory tests and field measurements”.
- [3] Bogacz R., Krzyżyński T. „O belce Bernoulliego-Eulera spoczywającej na lepkosprężystym podłożu poddanej działaniu ruchomego oscylacyjnego obciążenia” Prace IPPT-PAN, Reports 38, 1986.
- [4] Bogacz R., Nowakowski S. „On the influence of damping on the critical speed of spring-mass system moving along a Timoshenko beam on an elastic foundation” Journal of Theoretical and Applied Mechanics 3, 30, 1992, 607-623.
- [5] Groll, W.; Gąsiński, T.; Szolc, T. Doświadczalne badanie własności dynamicznych i statycznych toru kolejowego w warunkach Polskich Kolei Państwowych. Pojazdy Szynowe, 2002, nr 3, s. 46-52.
- [6] DBS 918 071-01: Unterschottermatten zur Minderung der Schotterbeanspruchung, 2006.
- [7] DB Netze Richtlinie 820: Grundlagen des Oberbaues, 2013.
- [8] DB Richtlinie 836.4106: Übergänge zwischen Erd- und Kunstbauwerken, 2014.
- [9] DIN V 45673-4 „Mechanische Schwingungen – Elastische Elemente des Oberbaus von Scheinenzugwegen – Teil 4“, 2008.
- [10] DIN 45672; 2009 „Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen. Teil 1: Messverfahren, Teil 2: Auswertverfahren.
- [11] DIN 45673-5 „Mechanical vibration – resilient elements used in railway tracks,. Part 5: laboratory test procedures for under-ballast mats”, 2010.
- [12] Karta UIC 719-1R „Recommendations for the use of Under Ballast Mats”, 2011.
- [13] Müller-Borutta „Zur Dimensionierung Elastischer Elemente des Oberbaus”, IMB Dynamik, 2010.

- [14] ÖBB Richtlinie B50-1, 2010.
- [15] Wettschurek R. G. at al. „Noise and vibration from railroad traffic” w Müller G., Möser M. “Handbook of Engineering Acoustics”, Springer, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2013.
- [16] Steiner E., Kuttelwascher C., Prager G., „Druckausbreitung von belasteten Eisenbahnschwellen im verschmutzten Gleisschotter“, ETR Austria, Juni 2014.
- [17] Jemielita G. “Generalization of the Kerr foundation model”, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 4, 30, 1992, 843-853.
- [18] Lei X., Noda N.A. ”Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile” Journal of Sound and Vibration 258(1), 2002, 147–165.
- [19] Savidis S. Bode C. Hirschauer R. & Hornig J. "Dynamic soil-structure interaction with partial uplift" Structural Dynamics - EURODYM ', Fryba & Naprstek (eds) 1999 Balkema, Rotterdam.
- [20] Strzyżakowski Z., Willner K. „Rail vibrations in the high frequency range”, ZAMM, 72, 4, 1992, T132-T134.
- [21] Stypuła K.; Nowoczesne metody ochrony przed drganiami wywołanymi eksploatacją transportu szynowego. Mat. konf. Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie, nr 132. Kraków 2006, s. 217-239.
- [22] Stypuła K.; Drgania generowane w podłożu przez transport szynowy i ich wpływ na budynki i ludzi w budynkach. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych. Naprawy i wzmocnienia: podłoża budowlanego, fundamentów i budowli podziemnych, głębokie wykopy, składowiska odpadów, wpływy środowiskowe w podłożu. Wykłady XXIV Ogólnopolskiej Konferencji Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji „Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych”, Wisła 2009, t. II, s. 395-420.
- [23] Kawecki J., Stypuła K.; Naruszenie wymagań dotyczących zapewnienia ludziom w budynku niezbędnego komfortu wibracyjnego jako stan zagrożenia awaryjnego. Inżynieria i Budownictwo nr 5/2011, s. 266-269.
- [24] Szcześniak W. “Statyka, dynamika i stateczność nawierzchni i podtorza kolejowego, przegląd podstawowych pozycji literatury”, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej” Budownictwo, z. 129, 1995, 1-220.
- [25] UIC Project Under Sleeper Pads –Summarizing Report, March 2009.
- [26] Vostroukhov, A.V., Metrikine A.V. “Periodically supported beam on a visco-elastic layer as a model for dynamic analysis of a high-speed railway track”, Int. J. Solids and Structures, no. 40, 2003
- [27] Sołkowski J. „Efekt progowy w nawierzchniach szynowych”, Monografia nr 435, Politechnika Krakowska, 2013 [8] Zboiński K., Woźnica P. Optimisation of the railway transition curves' shape with use of vehicle-track dynamical model. Archives of Transport, 22(3), str. 387-407, 2010.

PROBLEMS ASSOCIATED WITH MODELING OF INSERTION LOSS IN RAIL TRACKS IN THE LIGHT OF EUROPEAN STANDARDS

Summary

In the paper a review has been presented of problems arising during modeling and carrying out in-situ measurements of vibration attenuation of rail tracks equipped with elastic insertions. Several laboratory standards have been mentioned as well as standards concerning modelling and in-situ measurements that are used by European railways. The standard measures of insertion loss have been given and some factors that influence the predictions of insertion loss have been pointed out. The deficiency of Polish State Railways' regulations has been shown both as to the theoretical aspects of track modeling and to the requirements the suppliers should fulfill while offering their products.

Keywords: ballasted tracks, ballastless tracks, elastic insertions, vibroisolation, standards.

Dane autora:

Dr hab. inż. Juliusz Sołkowski

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej

Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego

e-mail: jsolkow@pk.edu.pl

telefon: +48 12 628 2390