

## OPIS NEROVNOSTÍ KOĽAJE AKO NÁHODNÉHO PROCESU

Daniel KALINČÁK

Katedra koľajových vozidiel, motorov a zdvíhadiel, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita Žilina, Slovenská republika

### 1. Úvod

V príspevku sa uvádzajú niektoré poznámky k opisu náhodných nerovností koľaje, najmä formou výkonových spektrálnych hustôt (VSH) a ich aproximácií rôznymi matematickými výrazmi. Poukazuje sa tiež na niektoré skreslenia priebehu VSH spôsobené numerickým výpočtom štatistických charakteristík. Znalosť priebehov štatistických charakteristík nerovností koľaje je potrebná pre výpočet dynamických odoziev v konštrukcii koľajových vozidiel pri jazde po reálnej koľaji. V príspevku sa tiež uvádzajú niektoré priebehy VSH zistené experimentálne.

### 2. Poznámky k určovaniu priebehov štatistických charakteristík nerovnosti koľaje.

Nerovnosti koľaje spôsobujú budenie dynamickej sústavy koľajového vozidla pri jeho jazde po koľaji. Väčšina nerovností koľaje má stochastický charakter, preto je potrebné použiť na ich opis adekvátne štatistické charakteristiky. Z mnohých štatistických charakteristík, ktoré je možné použiť na opis takýchto nerovností, majú s ohľadom na ich použitie pri dynamických výpočtoch najväčší význam kovariančná funkcia a najmä výkonová spektrálna hustota.

Nerovnosti koľaje sa obvykle rozdeľujú na zvislé a priečne. Zo zvislých nerovností jednotlivých koľajnicových pásov sa spravidla odvodzujú dva druhy nerovností, a to zvislé nerovnosti osi koľaje v pozdĺžnom profile (používajú sa ako budenie pre zvislý chod vozidla) a priečne prevýšenie koľajnicových pásov obvykle vo forme uhlových výchylek (toto však predstavuje jeden z budiacich vstupov pre priečny chod vozidla). Z priečných nerovností sa obvykle uvažujú priečne odchýlky osi koľaje a odchýlky rozchodu koľaje.

V ďalšom sa zameriame na opis zvislých nerovností koľaje.

Samotná koľaj je zložitá dynamická sústava a pri pôsobení premenlivého pohyblivého zaťaženie spôsobeného dvojkolesiami koľajových vozidiel mení svoj tvar. Aj zmena tvaru koľaje je náhodná, pretože jej priehyb je daný nielen zvislou poddajnosťou koľajníc, pružnými podložkami medzi päťami koľajníc a podkladnicami, ale aj kvalitou štrkového lôžka, najmä skutočným stavom podbitia jednotlivých podvalov, prípadne aj poruchami únosnosti železničného spodku. Na deformácie koľaje majú vplyv aj dynamické vlastnosti koľajového vozidla pohybujúceho sa po nej. Ďalším problémom je prípadná vlnkovitosť koľajníc, avšak táto sa prejavuje vo vysokofrekvenčnej oblasti, ktorá presahuje rozsah vlnových dĺžok uvažovaných v tomto príspevku.

Bolo vypracované viacero modelov koľaje ako dynamickej sústavy, napr. [1, 2, 3], kde sa dospelo k prvým vlastným frekvenciám koľaje vo zvislom smere. Tieto sa podľa uvedených literárnych prameňov pohybujú v pomerne širokých medziach od cca 40 Hz pre zlú koľaj [1] cez cca 100 Hz pre kvalitnú koľaj [1] až po hodnoty okolo 200 Hz [2], resp. až vyše 250 Hz [3]. Pri niektorých meraniach však bola zistená prvá vlastná frekvencia koľaje výrazne nižšia (okolo 20 Hz) [4].

Všetky uvedené dynamické modely koľaje predpokladajú homogénne parametre uloženia koľajníc na podvaloch a uloženia podvalov v štrkovom lôžku, čo môže byť približne splnené pri veľmi kvalitne udržiavanej koľaji. Pri bežnej kvalite koľaje, nevraviac už o nekvalitnej koľaji, tento predpoklad splnený nie je.

V prípade, že opis nerovností koľaje vo forme VSH sa používa napríklad na optimalizáciu vypruženia koľajového vozidla, stačí uvažovať iba obmedzený frekvenčný rozsah, povedzme do cca 15 Hz. Z uvedených dôvodov potom možno približne pokladať za budiace nerovnosti koľaje napríklad trajektórie nápravových ložísk.

Experimentálne zisťovanie priebehu nerovností koľaje môže byť založené na geodetických metódach, avšak tento spôsob má niekoľko zásadných nedostatkov. Jednak je časovo náročný a najmä je ním bežne možné merať iba nazaťaženie koľaj, čo vnáša značné odchýlky od skutočného priebehu tvaru koľaje zaťaženej vozidlom pri jazde. Preto sa tento spôsob prakticky nepoužíva.

Iný spôsob merania priebehu nerovností koľaje je založený na použití meracích vozňov na meranie GPK. V tomto prípade sa meria zaťažená koľaj, ale spravidla výrazne menej, ako zodpovedá maximálnym dovoleným nápravovým zaťažением. Tu však dochádza ku značným skresleniam priebehu nameraných nerovností, ktoré je spôsobené prenosovou funkciou meracieho systému, ktorej hodnota sa pohybuje v rozmedzí 0 až 2. Aj keď je možné namerané údaje korigovať inverznou funkciou k prenosovej funkcii meracieho systému [5], predsa výsledky takýchto meraní [5, 6] sa výrazne odlišujú od iných meraní, najmä pre nerovnosti väčších vlnových dĺžok (nad cca 20 m).

Najpoužívanejší spôsob zisťovania VSH zvislých nerovností koľaje je nepriamy, meraním zvislých zrýchlení ložiskových skriní nápravových ložísk. Takýto spôsob merania tiež vnáša určité nepresnosti, spôsobené napríklad poddajnosťou železničných kolies, prípadne tuhosťou styku kolesa s koľajnicou, ale pre obmedzený frekvenčný rozsah do niekoľko desiatok Hz sú tieto chyby zanedbateľné. Z takto získaných záznamov sa priamo (pomocou rýchlej Fourierovej transformácie), alebo nepriamo prostredníctvom autokovariančnej funkcie vypočítajú VSH zvislých zrýchlení ložiskových skriní, resp. zvislých zrýchlení v osi koľaje (stredú nápravy) a uhlových zrýchlení spôsobených vzájomným prevýšením koľajnicových pásov, čo je častejší prípad. Takto získané VSH zrýchlení sa pomocou známych vzťahov

Daniel Kalinčák:

(napr. [7]) prepočítajú na VSH trajektórií ložiskových skriní, resp. častejšie zvislých pohybov stredú náprav a uhlových výchyliek náprav.

Aj tu treba počítať s určitými chybami a skresleniami priebehov VSH spôsobenými použitými numerickými metódami výpočtu a tým, že sa vždy spracováva iba realizácia náhodného procesu konečnej dĺžky. Výpočtami získavame iba odhad priebehu VSH s určitou pravdepodobnosťou a nie skutočný priebeh VSH. Je možné určiť pásmo, v ktorom leží skutočný priebeh VSH s určitou pravdepodobnosťou  $(1 - \alpha)$ , ktorá sa volí obvykle 0,8 alebo 0,9, okolo vypočítaného odhadu priebehu VSH, ktorý označíme  $S(f)$ . Platí, že pre pravdepodobnosť výskytu  $(1 - \alpha)$  skutočného priebehu VSH, označeného  $S(f)$ , leží v intervale danom vzťahom (1)

$$P \left[ \frac{n \cdot \hat{S}(f)}{\chi_{n, \alpha/2}^2} \leq S(f) \leq \frac{n \cdot \hat{S}(f)}{\chi_{n, 1-\alpha/2}^2} \right] = 1 - \alpha \quad (1)$$

Pre obvyklé pomery, kedy sa berie autokovariančná funkcia v dĺžke 10% realizácie vyhodnocovaného náhodného procesu, počet stupňov voľnosti rozloženia  $\chi^2$  je  $n = 30$ . Ak budeme uvažovať interval spoľahlivosti  $(1 - \alpha) = 0,9$ , potom skutočný priebeh VSH  $S(f)$  bude ležať v intervale  $0,685 \cdot S(f)$  až  $1,622 \cdot S(f)$ , čo je pomerne široký interval. Tento sa dá zúžiť, ak sa spracováva relatívne (vzhľadom na dĺžku autokovariančnej funkcie) dlhšia realizácia náhodného procesu. S podobným problémom sa stretávame aj pri použití priamej metódy výpočtu VSH (FFT). Na spôsoby obmedzenia týchto chýb je poukázané napr. v [7].

Ďalšie skreslenie priebehu odhadu VSH je spôsobené použitím korelačného, resp. spektrálneho okienka, ktoré sú medzi sebou viazané prostredníctvom Fourierovej transformácie. V podstate možno konštatovať, že stredná hodnota odhadu VSH zodpovedá „prezretiu si“ teoretickej VSH (ktorú nepoznáme) cez spektrálne okienko, čo sa dá zapísať konvolutórnym integrálom (2)

$$\hat{S}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} W(g) \cdot S(f - g) \cdot dg \quad (2)$$

kde  $W(g)$  je funkcia opisujúca spektrálne okienko,

$S(f)$  je odhad VSH,

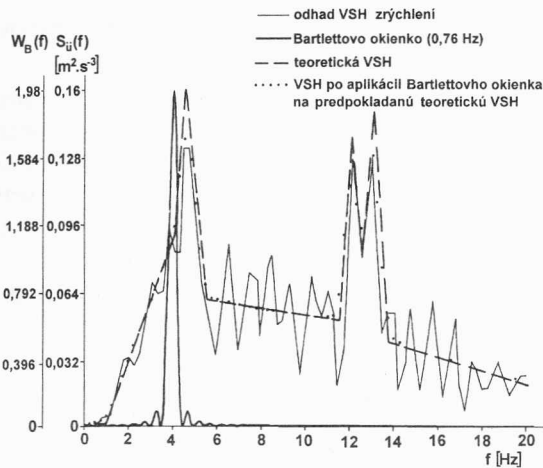
$S(f - g)$  je teoretický priebeh VSH.

Pri výpočte odhadu VSH sa často používa pomerne jednoduché trojuholníkové (Bartlettovo) okienko, ktorého tvar vo frekvenčnej oblasti je (3)

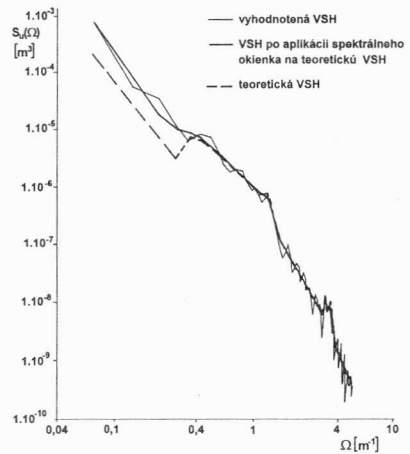
$$W_B(g) = T \cdot \left[ \frac{\sin(2\pi \cdot T \cdot g)}{\pi \cdot T \cdot g} \right]^2 \quad (3)$$

kde  $T$  je dĺžka autokovariančnej funkcie použitej na výpočet odhadu VSH.

Ako bolo ukázané v [8] s ohľadom na typický priebeh VSH zvislých zrýchlení (**obr. 1**, kde je zakreslený aj tvar príslušného Bartlettovho okienka nastaveného na frekvenciu 4 Hz), dochádza najmä pri najnižších frekvenciách k významnému nadhodnoteniu priebehu odhadu VSH oproti skutočnosti. Toto je očividné najmä po prepočítaní VSH zrýchlení na VSH výchyliek, ako je to ilustrované na **obr. 2**.



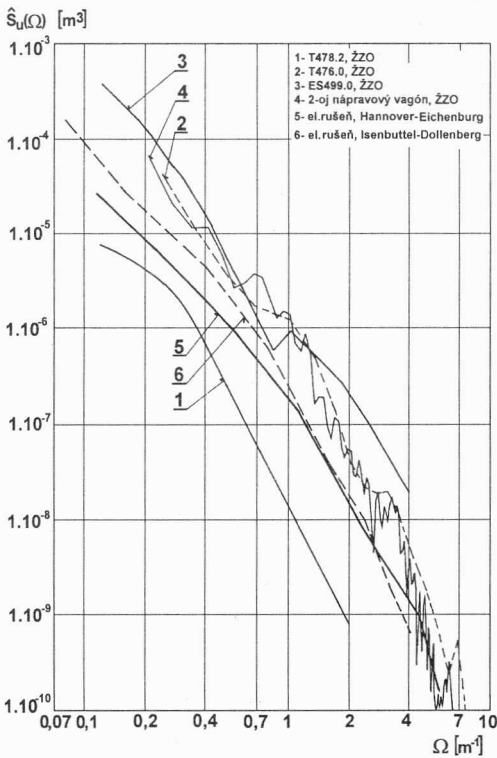
Obr. 1. K vplyvu Bartlettovho okienka na odhad priebehu VSH zrýchlení.



Obr. 2. Vplyv spektrálneho okienka na skreslenie priebehu VSH nerovností.

### 3. Niektoré výsledky meraní VSH zvislých nerovností koľaje

V ďalšom uvedieme niektoré výsledky vyhodnotenia priebehov VSH zvislých nerovností nameraných na skutočných tratiach.



Obr. 3. Prehľad nameraných priebehov VSH zvislých nerovností koľaje na ŽZO.

Na skúšanie chodových vlastností koľajových vozidiel je okrem iného určený ŽZO v Cerheniciach. Preto je dôležité poznať priebehy VSH nerovností koľaje na ňom. Treba poznamenať, že kvalita koľají na ŽZO bola v rôznom čase rôzna a aj výsledky výpočtov priebehov VSH sú značne rozdielne, ako je to zrejmé z obr. 3. V tomto obrázku sú priebehy 1 až 4 zistené na ŽZO pri meraniach na rôznych vozidlách v rôznom čase. Je zrejmé, že uvedené priebehy sú značne rozptýlené a ťažko nájsť jediný priebeh, ktorý by koľaj na ŽZO plne vystihoval.

Z priebehov VSH zvislých nerovností zistených na ŽZO v Cerheniciach sa odchyľuje veľmi výrazne najmä priebeh č. 1, ktorý bol prevzatý z [9]. Tento priebeh bol vyhodnotený analógovou metódou s použitím 1/2 oktávových filtrov. Ostatné priebehy boli získané numerickým výpočtom, vrátane priebehu č. 4, ktorý bol vyhodnotený na KKMZ v rámci riešenia VÚ III-7-2/5A [10].

Priebehy č. 5 a 6 sú prevzaté zo zahraničných prameňov a slúžia iba na porovnanie.

Z uvedených obrázkov je zrejmé, že priebehy vyhodnotených VSH nerovností koľaje sú, najmä ak je použité numerické vyhodnocovanie, značne zvlnené. Preto sa spravidla nahrádzajú aproximáciami vhodnými matematickými funkciami obsahujúcimi spravidla 2 až 4 parametre. V [11] je uvedené niekoľko používaných aproximačných vzťahov pre VSH zvislých nerovností koľaje. Pre najjednoduchšiu dvojparametrickú aproximáciu v tvare

$$S_u(\Omega) = A \cdot \Omega^{-n} \quad (4)$$

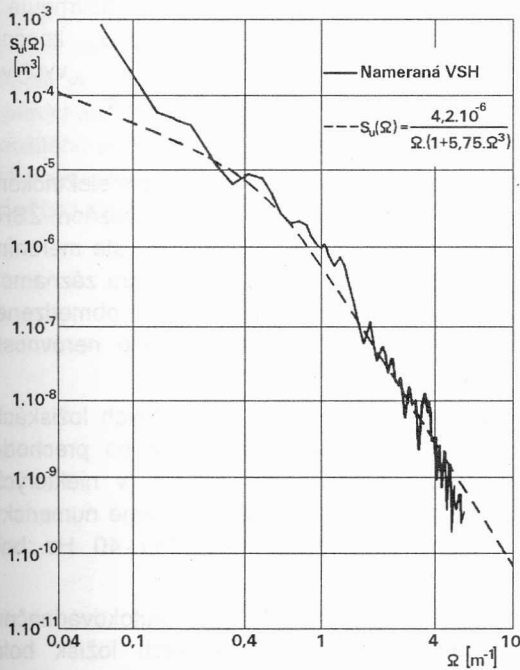
sa podľa [11] pre naše trate berú parametre podľa TAB 1.

**TAB. 1**

Druh trate	A	n
ŽZO	$2,5 \cdot 10^{-8}$	3
Hlavné trate	$1 \cdot 10^{-7}$	3
Vedľajšie trate	$4 \cdot 10^{-7}$	3

V [10] bola pre nameraný a vypočítaný priebeh VSH zvislých nerovností na ŽZO odvodená aproximácia v tvare:

$$S_u(\Omega) = 4,2 \cdot \frac{10^{-6}}{\Omega \cdot (1 + 5,75 \cdot \Omega^3)}, \quad (5)$$



ktorá zohľadňuje aj vyššie spomínaný vplyv spektrálneho okienka na priebeh vyhodnenej VSH v oblasti dlhých vln. Vyhodnotený priebeh VSH zvislých nerovností koľaje na ŽZO, ako aj aproximácia podľa vzťahu (5) sú uvedené na obr. 4 a je zrejmé, že táto aproximácia dobre vystihuje vyhodnotený priebeh VSH. Pri tomto meraní boli zrýchlenia snímané na nápravových ložiskách dvojnápravového osobného vozňa pri rýchlosti jazdy cca 80 km/h v polovici 70-tych rokov.

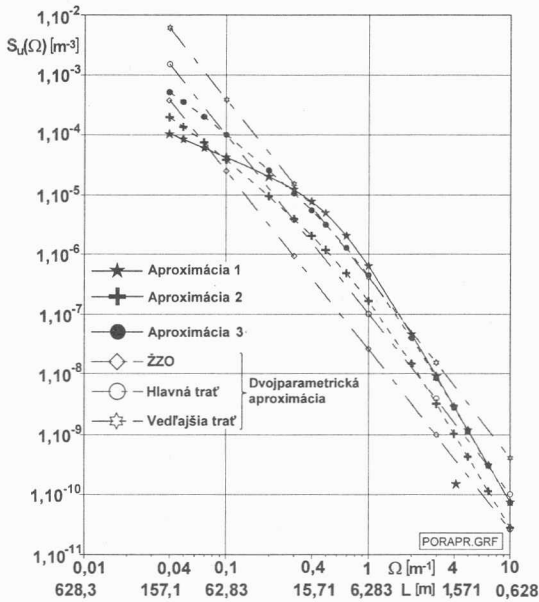
V ďalších obrázkoch je táto aproximácia označovaná ako „Aproximácia 1“.

**Obr. 4.** Porovnanie nameranej VSH zvislých nerovností koľaje a jej aproximácie

Podľa ORE B 176 sa berie VSH pre zvislé nerovnosti koľaje tvare

$$S_u(\Omega) = \frac{A \cdot 0,8246^2}{(\Omega^2 + 0,0206^2) \cdot (\Omega^2 + 0,8246^2)}, \quad (6)$$

kde  $A = 4,032 \cdot 10^{-7}$  pre dobrú trať a  $A = 1,08 \cdot 10^{-6}$  pre nekvalitnú trať (v obrázkoch sú uvádzané ako „Aproximácia 2“ a „Aproximácia 3“).



**Obr. 5.** Porovnanie niektorých aproximačných vzťahov pre VSH zvislých nerovností koľaje

Existujú aj iné aproximačné vzťahy (viď napr. [11]). Prehľad priebehov vyššie uvedených aproximačných vzťahov VSH zvislých nerovností koľaje je uvedený na obr. 5. Z uvedených priebehov aproximácií priebehov VSH zvislých nerovností koľaje je zrejmé, že dvojparametrické aproximácie nezohľadňujú nadhodnotenie VSH v oblasti veľkých vlnových dĺžok spôsobené vplyvom spektrálneho okienka. Ostatné aproximácie toto v istej miere zohľadňujú. Rozdiel medzi uvedenými aproximáciami je aj v oblasti malých vlnových dĺžok nerovností, kde zložitejšie aproximácie majú v daných logaritmických súradniciach väčší sklon (blíži sa tu exponentu rovnému 4). Okrem toho dvojparametrická aproximácia navrhnutá v [11] pre ŽZO je zrejme značne podhodnotená, ako to vyplýva z porovnania obr. 5 s obr. 3 a 4.

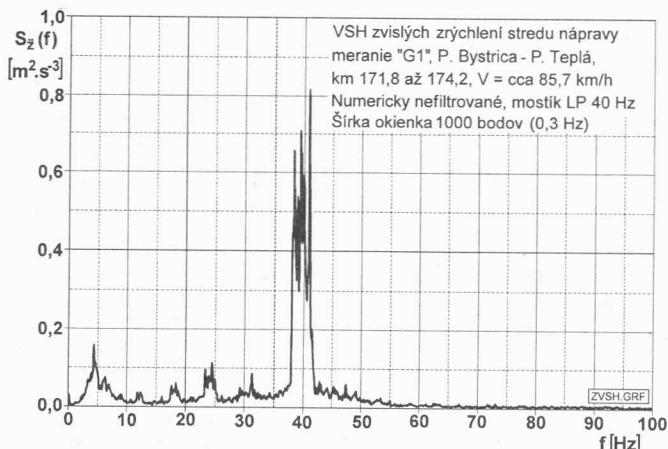
V roku 1996 boli vykonané pomerne rozsiahle merania na dvojsystémovom elektrickom rušni radu 350 na trati Žilina - Púchov [12] pri súčasnom meraní GPK meracím vozňom ŽSR. Účelom týchto meraní bolo preveriť možnosti monitorovania stavu železničnej trate meraním zrýchlení na vybraných častiach hnacieho vozidla [13, 14, 15]. Čiastočná analýza záznamov meraní v uvedenom zmysle bola vykonaná v [16]. V tomto príspevku uvedieme v obmedzenej miere ukážky výsledkov meraní a ich vyhodnotenia v oblasti VSH zrýchlení, resp. nerovností koľaje.

Okrem iných veličín boli merané zvislé zrýchlenia na oboch nápravových ložiskách prednej nápravy (pri niektorých meracích jazdách zadnej nápravy) a tieto po prechode dolnofrekvenčnou priepusťou nastavenou vo väčšine prípadov na 40 Hz (v niektorých prípadoch na 80 Hz) boli zaznamenané na meracom magnetofóne a nasledovne numericky spracované na KKVMZ. Záznamy filtrované dolnofrekvenčnou priepusťou 40 Hz boli navzorkované vzorkovacou frekvenciou 200 Hz.

Na výpočet VSH zrýchlení bola použitá nepriama metóda (cez autokovariančnú funkciu). Časť navzorkovaných priebehov zvislých zrýchlení nápravových ložísk bola spracovaná tak, že sa vypočítali zvislé zrýchlenia v strede nápravy (súčtový signál) a uhlové zrýchlenia nápravy spôsobené priečnym prevýšením koľajnicových pásov (rozdielový signál).

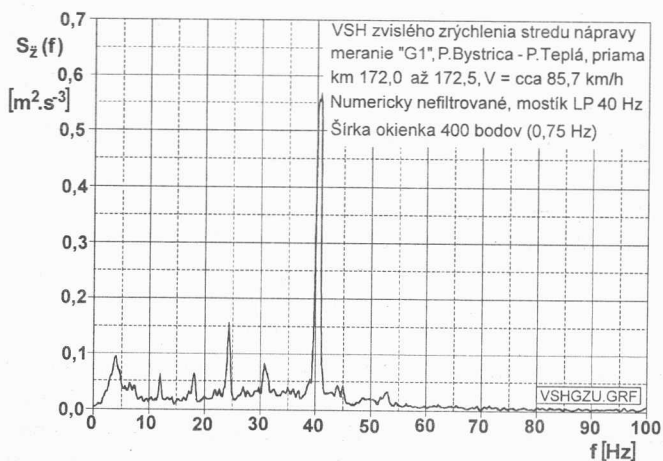
Na obr. 6 je uvedená VSH zvislých zrýchlení prepočítaných na stred nápravy z úseku trate dlhého cca 2,4 km, ktorý však zahŕňa aj oblúky. Výrazné sú zrýchlenia v oblasti 40 Hz, a to napriek tomu, že táto frekvenčná oblasť bola čiastočne potlačená dolnofrekvenčnou priepusťou nastavenou práve na 40 Hz. S ohľadom na konštatovania uvedené na začiatku tohoto príspevku je možné, že ide o vplyv vlastných frekvencií koľaje v danom úseku trate. Vo

frekvenčnej oblasti v okolí 40 Hz bola VSH zrýchlení veľmi výrazná na viacerých, ale nie na všetkých vyhodnocovaných úsekoch trate.



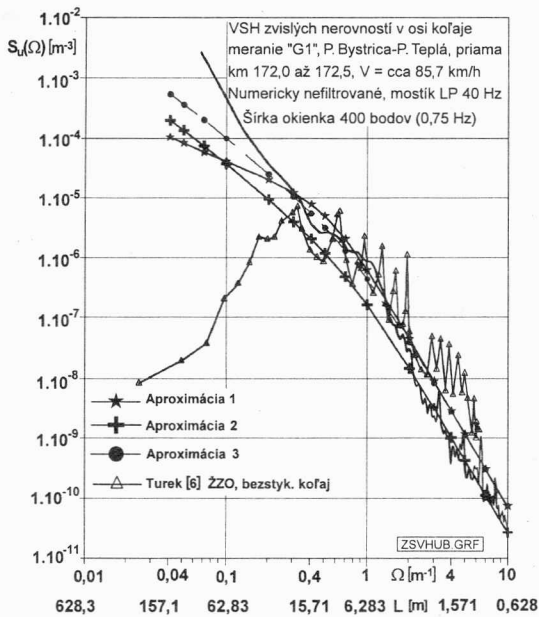
Obr. 6. VSH zvislých zrýchlení stredú nápravy.

Pre porovnanie je na obr. 7 uvedený priebeh VSH zrýchlení z priamej časti toho istého vyhodnocovaného úseku, žiaľ dlhšej iba cca 500 m (trať, na ktorej bolo meranie vykonané je značne oblúkovitá). Oba priebehy VSH majú podobnú frekvenčnú štruktúru, ale v priamom úseku je v okolí frekvencie 40 Hz sústredená menšia časť rozptylu zrýchlení ako v predchádzajúcom prípade. Veľkosti špičiek v spektrách sú tiež ovplyvnené rozličnou šírkou použitého spektrálneho okienka. Pri vyhodnocovaní VSH v priamej koľaji muselo byť použité širšie okienko s ohľadom na výrazne kratší vyhodnocovaný úsek trate, teda špičky priebehu VSH boli čiastočne potlačené.



Obr. 7. VSH zvislých zrýchlení stredú nápravy na priamom úseku trate

Z VSH zrýchlení boli vypočítané VSH výchyliek. Jeden z priebehov (pre priamy úsek trate) je uvedený na obr. 8. V grafe sú tiež uvedené tri zo skôr spomínaných aproximácií priebehov VSH. Je zrejmé, že tieto aproximácie, najmä prvá a tretia, vcelku prijateľne



**Obr. 8.** Priebeh VSH zvislých nerovností v osi koľaje na priamom úseku a niektoré z aproximácií VSH.

#### 4. Záver

Ako je z uvedeného zrejmé, priebehy VSH zvislých nerovností (a platí to aj pre iné druhy nerovností) koľaje aj pre tú istú trať sa dosť výrazne medzi sebou odlišujú. Podobne ani používané aproximácie priebehov VSH nevystihujú úplne ich skutočné priebehy. Je zrejmé, že najjednoduchšie, dvojparametrické, aproximácie sú nevyhovujúce. Ďalšie uvedené aproximácie aj napriek určitým odchýlkam skutočné priebehy VSH vystihujú s prijateľnou presnosťou, najmä ak sa tieto používajú ako vstup do optimalizačných výpočtov vypruženia koľajových vozidiel.

Je potrebné tiež zvážiť, v akom rozsahu vlnových dĺžok je účelné VSH zvislých nerovností uvažovať, prípadne nerovnosti akých vlnových dĺžok je možné pri udržiavových zásahoch v koľaji odstrániť. To, aký rozsah vlnových dĺžok sa má pri výpočtoch dynamiky zohľadňovať, závisí jednak od účelu použitia a veľmi výrazne od rýchlosti jazdy uvažovanej pri výpočtoch. Je to z toho dôvodu, že pri optimalizácii vypruženia pojazdu obvykle stačí uvažovať iba pomerne obmedzený rozsah frekvencií a ním zodpovedajúcich vlnových dĺžok nerovností, ale pre celý uvažovaný rozsah rýchlostí jazdy. Rozsah frekvencií musí s dostatočnou rezervou pokrývať aspoň vlastné frekvencie koľajového vozidla pri použití modelu so sústredenými parametrami, prípadne aj najnižšie vlastné frekvencie ohybových kmitov skrine koľajového vozidla. V prípade, že stačí uvažovať frekvenčný rozsah budenia v rozmedzí 0,5 až 16 Hz, zodpovedá tomu rozsah vlnových dĺžok nerovností koľaje v závislosti od rýchlosti jazdy uvedený v **TAB. 2**.

vystihujú vyhodnotený priebeh VSH zvislých nerovností koľaje. V oblasti krátkych vln aproximácia 2 vystihuje dobre „strednú“ hodnotu VSH, kdežto ostatné dve aproximácie lepšie zachytávajú špičky v priebehu VSH. V oblasti dlhých vln sa všetky aproximácie odchyľujú od vyhodnoteného priebehu VSH, ale ako už bolo spomenuté, táto odchylka v podstate kompenzuje skreslenie priebehu odhadu VSH spôsobené aplikáciou spektrálneho okienka.

V tomto obrázku je nakreslený aj priebeh VSH zvislých nerovností získaný meraním na meracom vozni na ŽZO [5, 6]. Je zrejmé, že tento priebeh VSH sa výrazne odlišuje, najmä v oblasti veľkých vlnových dĺžok, od priebehov VSH získaných meraním zrýchlení na ložiskových skrinách koľajových vozidiel, ale aj od používaných aproximácií priebehov VSH.



TAB. 2.

V [km/h]	80	120	160	200	250
L [m]	44,4 - 1,4	66,7 - 2,1	88,9 - 2,8	111,1 - 3,5	138,9 - 4,3
$\Omega$ [m <sup>-1</sup> ]	0,14 - 4,52	0,094 - 3,02	0,071 - 2,26	0,065 - 1,81	0,045 - 1,45

Je zrejme, že rozsah vlnových dĺžok budenia, ktoré sa musia vo výpočtoch uvažovať výrazne závisí od uvažovanej rýchlosti jazdy a so zvyšujúcou rýchlosťou jazdy sa presúva k väčším vlnovým dĺžkam.

Posúďme ešte rozsahy vlnových dĺžok nerovností koľaje s ohľadom na možnosti ich ovplyvňovania údržbovými zásahmi v koľaji. Najpoužívanějšími technickými prostriedkami na úpravu GPK sú automatické strojné podbíjačky. To, nerovnosti akých vlnových dĺžok sú schopné odstrániť, alebo aspoň zmenšiť, okrem iného závisí aj od použitých meracích systémov slúžiacich pre riadenie práce stroja. Obecne u bežných podbíjačiek je nemožné podbitím odstrániť nerovnosti s vlnovými dĺžkami menšími ako cca 2 - 2,5 m. Na opačnej strane spektra pri použití bežných meracích systémov je vlnová dĺžka nerovností, ktorá sa dá ešte významnejšie prácou ASP ovplyvniť, obmedzená rádovo na 20 - 30 m. Pri použití laserových, alebo podobných systémov sa môže táto hranica výrazne posunúť k vyšším hodnotám (i na stovky metrov). Tu sa však už naráža na pozdĺžny profil trate daný terénom (zmeny sklonu trate).

Pokiaľ ide o nerovnosti malých vlnových dĺžok (pod 2 m) tieto je možné odstrániť iba použitím iných technológií (brúsenie, prípadne hobľovanie hlavy koľajníc), ktoré sa v našich podmienkach používajú iba veľmi málo.

Aj zisťovanie priebehov VSH v oblasti veľkých vlnových dĺžok je problematické. Je to z toho dôvodu, že pri meraní zrýchlení na nápravových ložiskách sa musia merať aj zrýchlenia pri veľmi nízkych frekvenciách, ktorých úroveň je veľmi nízka. S ohľadom na vysokú úroveň zrýchlení pri vyšších frekvenciách musí byť však citlivosť meracej aparatury nastavená práve s ohľadom na tieto vysoké hodnoty zrýchlení a nízke úrovne zrýchlenia nie je možné merať s dostatočnou presnosťou. Sú tu aj ďalšie problémy, ktoré však presahujú rozsah tohoto príspevku (napríklad rozlišovacia úroveň vzorkovacích prevodníkov, potreba merania dlhých úsekov trate, ak potrebujeme zistiť aj štatistické charakteristiky nerovností pri veľkých vlnových dĺžkach, čo už naráža na to, že sa dajú ťažko nájsť na bežných tratiach dostatočne dlhé priame úseky a pod.).

Z uvedeného je zrejme, že táto problematika je zložitá a vyžaduje ešte ďalšie skúmanie.

Poznámka: Príspevok vznikol v rámci riešenia IVÚ č. Sjf 7/98.

Lektoroval: Doc. Ing. Bohumil Culek, CSc.

Předloženo v lednu 1998.

## Literatúra.

- [1] Turek, J.: Dynamický model železniční trati. In: Zb. predn. konf. „Dynamika kolejových vozidel a železničních tratí“. DT ČSVTS Praha 1990.
- [2] Chudzikiewicz, A.: Study in the relation between the travelling speed and forces within the wheel/rail contact zone depending on the state of track maintenance. In: Machine Dynamics Problems. Vol. 11, 1995. Warsaw University of Technology. ISSN 0239-7730.
- [3] Droździel, J., Sowiński, B., Żochowski, A.: Method of solving steady-state and transient vibrations of discretely supported track. In: Machine Dynamics Problems. Vol. 11, 1995. Warsaw University of Technology. ISSN 0239-7730.
- [4] Petr, F.: Měření statických a dynamických charakteristik koleje. In: Žel.tech. 16 (1986) č. 2.
- [5] Singer, D.: Měření GPK ve svislém směru měřícími vozy ČSD. In: Zb. predn. konf. „Dynamika kolejových vozidel a železničních tratí“. DT ČSVTS Praha 1990.
- [6] Turek, J.: Dynamický model interakce vozidla a trati. In: Zb. predn. konf. „Dynamika kolejových vozidel a železničních tratí“. DT ČSVTS Praha 1990.
- [7] Lábaj, J., Kalinčák, D., Gajdoš, J., Gerlici, J., Kukuča, P., Lack, T.: Výpočtové metody v DMZ. ES ŽU 1997. ISBN 80-7100-391-3
- [8] Kalinčák, D.: Vplyv šírky spektrálneho okienka na skreslenie priebehu spektrálnej výkonovej hustoty zvislých nerovností koľaje. In.: PaŠ VŠDS, série strojnica, zv. 13 (1983).
- [9] Ověření matematického modelu vozidla na lokomotivě T 478.2001. Dílčí správa k úkolu P14-124-05/03. VÚŽ Praha 1973.
- [10] Freibauer, L., Kalinčák, D.: Určenie známky akosti chodu vagóna budeného náhodnými nerovnosťami koľaje s nelinearitou v druhotnom vypružení. Správa k VÚ III-7-2/5A, č. spr.: KKV 103- 77, VŠD Žilina 1977.
- [11] Freibauer, L., Rus, L., Zahrádka, J.: Dynamika kolejových vozidel. Praha NADAS 1991. ISBN 80-7030-104-X.
- [12] Kalinčák, D., Fitz, P., Pomietlo, P., Gerlici, J., Šmída, S.: Meranie zrýchlení na vozidle a v kabíne rušňa r. 350. Správa k HČ HZ č. 46/96. Č. spr.: KKVMZ HZ-46/96. VŠDS Žilina 1996.
- [13] Kalinčák, D., Pomietlo, P.: Štúdia monitorovania stavu železničného zvršku hnacím vozidlom. Správa k VHČ HZ č. 85/95. Č. spr.: KKVMZ 01-95. VŠDS Žilina 1996.
- [14] Kalinčák, D., Pomietlo, P.: Možnosti monitorovania stavu tratí hnacím vozidlom. In: Zb. predn. VI. medzinárod. sem. "Traťové stroje v teorii a v praxi - SETRAS '96". Žilina 1996. VTS pri VŠDS Žilina. ISBN 80-710-359-X.
- [15] Kalinčák, D.: The possibility of monitoring the state of railway track by locomotives. In: Zb. IX. konf. naukovej „Drogi kolejowe“. Kraków-Kościełisko 1997. Politechnika Krakowska.
- [16] Kalinčák, D., Pomietlo, P., Gerlici, J., Šmída, S.: Analýza záznamov meraní zrýchlení na vozidle a v kabíne rušňa r. 350. Č. spr. ZOD-4-96/KA. VTS pri VŠDS Žilina 1996.

## Resumé

### OPIS NEROVNOSTÍ KOĽAJE AKO NÁHODNÉHO PROCESU

Daniel KALINČÁK

Príspevok je venovaný opisu náhodných nerovností koľaje formou výkonových spektrálnych hustôt a ich aproximácií rôznymi matematickými výrazmi. Poukazuje sa na niektoré možné skreslenia priebehu výkonovej spektrálnej hustoty spôsobené numerickým výpočtom štatistických charakteristík. Ide najmä o vplyv použitého spektrálneho okienka na priebeh výkonovej spektrálnej hustoty v oblasti veľkých vlnových dĺžok nerovností koľaje. V príspevku sa tiež uvádzajú niektoré

Daniel Kalinčák:

Opis nerovností koľaje jako náhodného procesu

priebehy výkonovej spektrálnej hustoty zvislých zrýchlení dvojkolesí namerané na skutočnej koľaji a z nich vypočítané priebehy zvislých nerovností koľaje. Je uvedené tiež porovnanie priebehov VSH zvislých nerovností koľaje zistené meraním zrýchlení na nápravových ložiskách koľajových vozidiel a priebehov zistených meraniami meracím vozňom.

### Summary

## DESCRIPTION OF TRACK IRREGULARITIES AS RANDOM PROCESS

Daniel KALINČÁK

The paper is devoted to description of random track irregularities by means of power spectral densities and its approximation by various mathematics expressions. It is hinted at some possible distortions of courses of spectral density due to numerical calculation of statistical characteristics. Especially is hinted at influence of used spectral window on course of power spectral density in area of long wavelength of track irregularities. Some courses of power spectral densities of the vertical acceleration of wheelset measured on track and calculated courses of vertical track irregularities are in paper too. There are presented courses of PSD of vertical track irregularities gained by measuring of vertical accelerations of axleboxes and compared with ones gained by measuring on track recording car.

### Resume

## DIE BESCHREIBUNG DER GLEISUNEVENHEIT ALS STOCHASTISCHER PROZESS

Daniel KALINČÁK

Der Beitrag wird der Beschreibung der zufälligen Gleisunebenheit in Form von der spektralen Leistungsdichte und ihrer Approximationen durch die verschiedenen mathematischen Ausdrücke gewidmet. Es wird auf manche durch die numerische Berechnung der statistischen Charakteristiken hervorgerufene mögliche Verlaufverzerrungen der spektralen Leistungsdichte hingewiesen. Besonders handelt es um den Einfluß des angewendeten Spektralfensterchens auf den Verlauf der spektralen Leistungsdichten in dem Bereich der großen Gleisunebenheit-Wellenlängen. In dem Beitrag werden auch manche Verläufe der spektralen Leistungsdichte der auf dem realen Gleis abgemessenden senkrechten Radsatz-Beschleunigungen und daraus berechnete Verläufe des vertikalen Gleisunebenheit aufgeführt. Es wird auch die Vergleichung der durch die Messung der Radsatzlager-Beschleunigungen auf den Schienefahrzeugen untersuchenden Verläufe der spektralen Leistungsdichte und die durch Messungen mittels des Meßwagens untersuchende Verläufe aufgeführt.

100

100

100

100

100