

MODELOVANIE VOZOVKY A PREKÁŽOK NA VOZOVKÁCH

Milan Lokšík, Cyril Belavý

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Strojnícka fakulta,
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava 1

Abstrakt

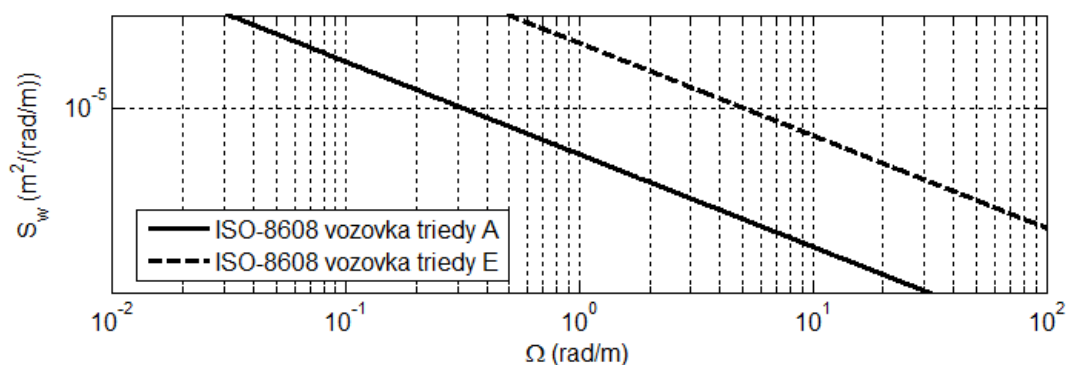
V článku je analyzovaný matematický model vozovky ako aj modely možných prekážok na vozovke. Cieľom je vytvoriť model vozovky, ktorý bude zodpovedať norme STN ISO 8608 a je možné ho prepojiť s modelom vozidla, ktorý je vytvorený v softvérovom prostredí MATLAB. Charakter signálu, ktorý reprezentuje amplitúdu nerovnosti vozovky môžeme zaradiť k stacionárnym náhodným signálom. Na vozovke sa však vyskytujú prekážky, ktoré vytvárajú tzv. nestacionarity v budiacich signáloch. Ide hlavne o rôzne spomaľovače. K signálom tohto typu možno zaradiť i výtlky na vozovkách, vyfrézované časti asfaltu a iné rôzne poškodenia vozovky.

1 Model vozovky

Zo štatistického hľadiska sa vozovka uvažuje ako náhodný signál s Gaussovským charakterom. Konkrétny typ vozovky môžeme interpretovať prostredníctvom integrovaného bieleho šumu, ktorý má intenzitu o veľkosti rovnej spektrálnej výkonovej hustote (SVH) uvažovanej vozovky. V práci [1] autor poukazuje na veľmi podobný priebeh SVH pre rôzne rozdielne typy vozoviek, z čoho usudzuje, že jednotlivé typy vozoviek môžu byť charakterizované funkciami s príslušnými parametrami. SVH je teda nielen nástroj na matematickú realizáciu profilu vozovky, ale aj nástroj na samotnú klasifikáciu vozovky. Jedno z prvých využití SVH v oblasti automobilového priemyslu bolo predstavené v práci [2], kde SVH bola aproximovaná lineárnou funkciou. V norme STN ISO 8608 sú klasifikované vozovky podľa ich charakteru do skupín A až E (od veľmi kvalitnej diaľnice po hrboľatú poľnú cestu) Tab. č. 1 a Obr. č.1.

Tab.1: Klasifikácia nerovností podľa STN ISO 8608

Trieda cesty	A	B	C	D	E
$S_{w_0} \cdot 10^{-6} (m^3/rad)$	1	4	16	64	256



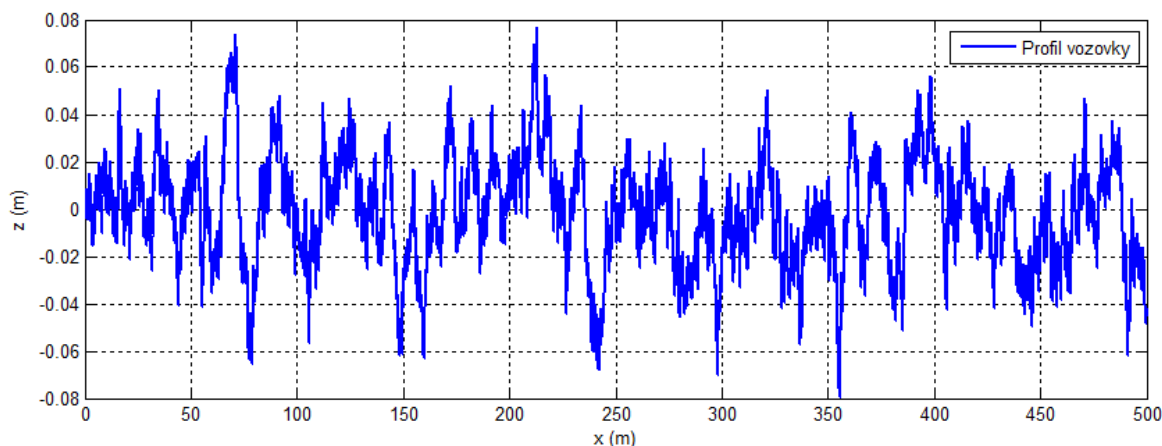
Obr. 1: Priebeh SVH pre rôzne typy vozoviek definovaných podľa normy STN ISO 8608
vzhľadom na frekvenciu signálu

Každá trieda je definovaná jej referenčným stupňom nerovnosti S_{w_0} . Podľa normy STN ISO 8608 je možné integrovaním náhodne vygenerovaného signálu s konštantnou spektrálnou výkonovou hustotou rovnajúcou sa zvolenej hodnote S_{w_0} , získať signál zodpovedajúci nerovnostiam vozovky danej triedy:

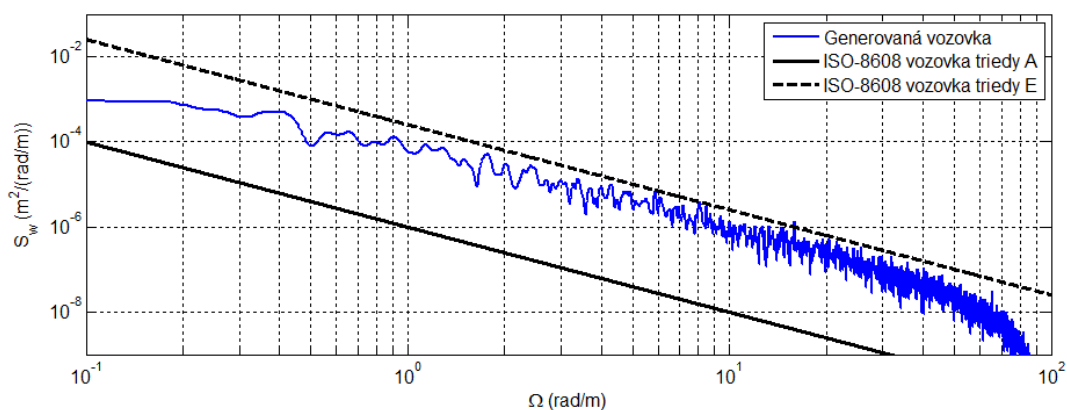
$$w(s) = \frac{\sqrt{S_{w_0} \pi}}{s} \xi, \quad (1)$$

pričom $s = \Omega i$ a ξ predstavuje náhodne vygenerovaný s SVH.

Ukážka vygenerovaného profilu vozovky so $SVH = 100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$ je znázornená na Obr. č. 2. a Obr. č. 3.



Obr. 2: Profil generovanej vozovky so $SVH=100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{rad}$



Obr. 3: Realizácia a klasifikácia tried vozoviek podľa normy STN ISO 8608

Ako vidno aj na obrázkoch číslo 2 a 3, v logaritmických súradniciach je závislosť amplitúd SVH rôznych vozoviek S_{w_0} vzhľadom k vlnovému číslu Ω , definovaná rovnobežnými priamkami. Na vyjadrenie tejto závislosti postačuje použitie prenosovej funkcie prvého rádu v tvare:

$$w = \frac{A_w}{s} \quad (3)$$

pričom A_w je konštanta zosilnenia filtra bieleho šumu, ktorý vstupuje do modelu v tvare zmeny rýchlosti nerovnosti vozovky s intenzitou 1 a veľkosťou, ktorú určíme ako:

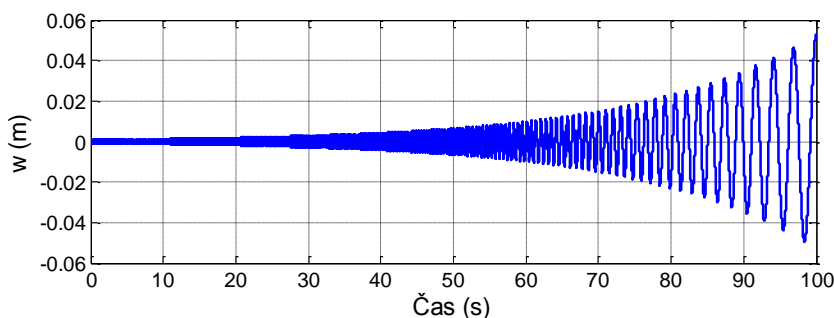
$$A_w = \sqrt{\frac{S_{w_0}}{\omega_0}} \cdot v \cdot 2\pi = \sqrt{S_{w_0}} \cdot v \quad (4)$$

kde ω_0 [m^3/rad] je konkrétna hodnota spektrálnej výkonovej hustoty nerovnosti vozovky pri vlnovej frekvencii $\omega_0=1$ [rad/m] a v je rýchlosť vozidla. Ak by sme rýchlosť vozidla položili rovnú $v=1$ [m/s], tak SVH signálu získaného z vytvoreného tvarovacieho filtra, má rovnaký priebeh ako je definovaný priebeh SVH pre nerovnosti vozovky v norme STN ISO 8608.

Ak budeme matematické modely transformovať do súradnicového systému, kde na vstupe do modelu vozidla bude len signál rýchlosti zmeny nerovnosti vozovky, potom v takto vytvorenom modeli vozidla stačí, ak sa matica vstupu náhodnej veličiny \mathbf{G} a matica jej prevodu na výstup \mathbf{H} vynásobia konštantou A_w .

Ako idealizovaný náhradný signál budenia zvolenej triedy vozovky sa pri experimentoch často používa integrovaný harmonický signál s konštantnou amplitúdou rýchlosti, Obr. č. 4. Tento typ budenia je však možné realizovať iba na skúšobných staniciach tzv. hydropulzoch (budenie

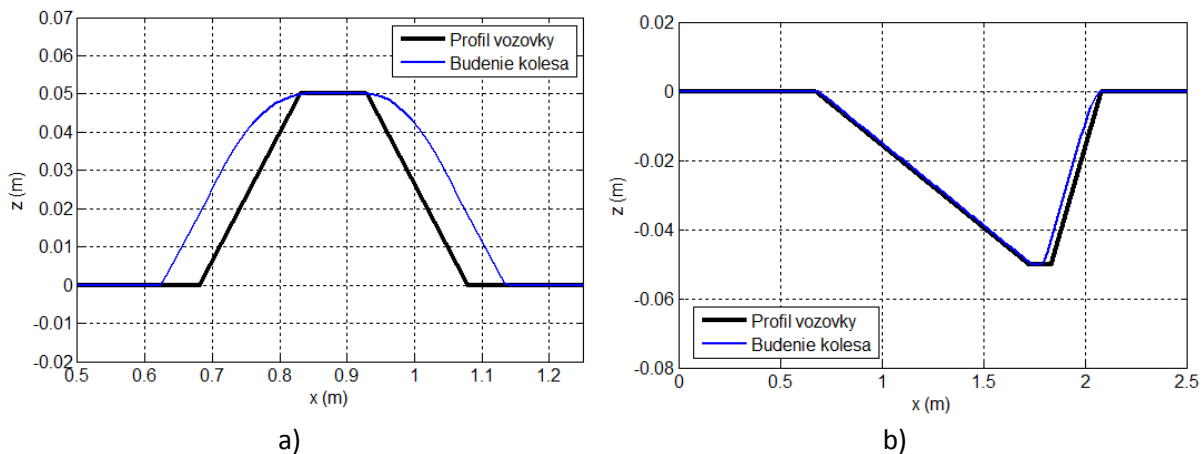
prostredníctvom hydraulických valcov) alebo pri numerických simuláciách. Jeho výhoda spočíva v tom, že k signálu je možné priamo priradiť jeho frekvenciu a pri štvorkanálovom budení je možné správnym fázovým posunom medzi signálmi karosériu vozidla vybudiť, tak aby izolovane kmitala iba vo vertikálnom smere alebo iba rotovala okolo priečnej alebo pozdĺžnej osi vozidla. Tento druh budenia má veľký význam najmä pri analýzach a pri odlaďovaní komponentov vozidla.



Obr. 4: Profil budiaceho signálu - Hydropulz (počiatočná frekvencia je 4 Hz a konečná 20 Hz)

2 Testovacie a reálne prekážky na vozovke

Ako prekážky na vozovkách môžeme chápať každé budenie, ktoré je posádka vozidla schopná jednoznačne identifikovať (vnímať) a oddeliť od bežného stochastického stacionárneho budenia opísaného v predošlej časti príspevku. Pri numerických simuláciách s matematickými modelmi vozidla, kde nie sú zohľadnené geometrické rozmery pneumatiky, sa musí dbať na to, aby vstupujúci signál do systému sa čo najviac zhodoval so signálom, ktorý vznikne odvalovaním kolesa po uvažovanej prekážke. Jedná sa najmä o prekážky s rýchlou zmenou amplitúdy ich profilu. Z tohto dôvodu bola vytvorená funkcia, ktorá podľa geometrických rozmerov kolesa vypočíta budenie, ktorým by prekážka vybudila systém vozidla, ak by koleso počas odvalovania nemalo svoj polomer (geometricky filter s ideálne tuhým kolesom). Grafické znázornenie je na Obr. č. 5.



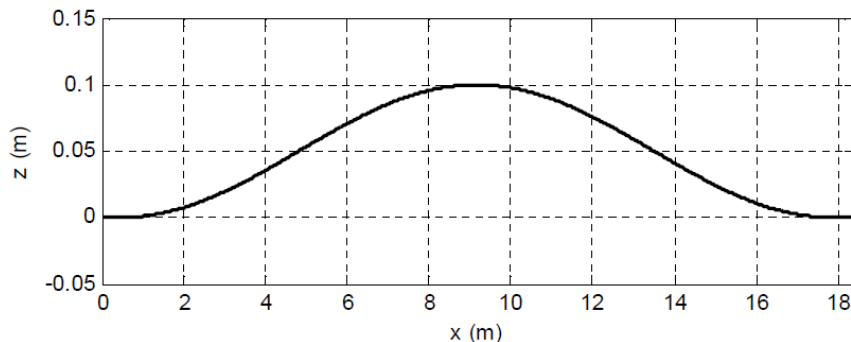
Obr. 5: Prekážka s profilom orientovaným a) pozitívne, b) záporne

Mnohé z prekážok sú na vozovke umiestnené zámerné, ako napr. spomaľovače pred výjazdom z parkovísk či pred prechodom pre chodcov. Geometricky tvar takýchto prekážok je navrhnutý tak, aby vyvolal pozornosť vodiča, respektíve vyvolal v systéme pruženia vozidla rázové kmitanie. Približne 5 cm vysokými a 45 cm dlhými prekážkami sa vybudzuje ráz kolesa (spomaľovače v strednej Európe) a približne 15 cm vysokými a až 14 m dlhými prekážkami sa vybudzuje ráz karosérie vozidla (spomaľovače vo Francúzku a južnej Európe). Profil spomaľovačov je spravidla pozitívne orientovaný, obrázok 5a). Na vozovkách sa však stretáme i s neúmyselne vytvorenými prekážkami, ktoré vznikli v dôsledku poškodenia profilu vozovky. Profil týchto prekážok je na rozdiel od už spomenutých spomaľovačov zväčša negatívne orientovaný, obrázok 5b).

Ako skúšobný idealizovaný signál na analyzovanie kmitania (aj rázu) karosérie vozidla sa často používa tzv. kosínusová prekážka (kosínusová vlna). Vlnová dĺžka kosínusovej prekážky je pritom zvyčajne zámerne nastavená tak, aby sa na vozidle vybudilo rezonančné kmitanie karosérie. Vo výpočte profilu kosínusovej vlny vystupujú nasledovné premene: rýchlosť vozidla v , výška amplitúdy vlny h_0 , rezonančná frekvencia kmitania karosérie vozidla f a dĺžka vozovky x .

$$z(x) = z_o \cos\left(\frac{\Omega}{x}\right) = z_o \cos\left(\frac{\omega}{v} x\right) = z_o \cos\left(\frac{2\pi f}{v} x\right) \quad (5)$$

Na Obr.6 je naznačený profil kosínusovej prekážky.



Obr. 6: Profil kosínusovej prekážky

3 Previazanosť ľavej a pravej stopy vozovky

Pre opis budenia, ktoré pôsobí na vozidlo v dôsledku odlišnosti priebehu nerovnosti pravej a ľavej stopy vozovky sa využíva korelačná funkcia, ktorá je v [3] vyjadrená nasledovným empirickým vzťahom:

$$G_{LR}(\Omega, c) = \left[1 + \left(\frac{\Omega_0}{\Omega_p} c^a \right)^k \right]^{-p} \quad (6)$$

kde c predstavuje rozchod kolies vozidla a ďalšie parametre funkcie G_{LR} sú uvedené v tabuľke 2.

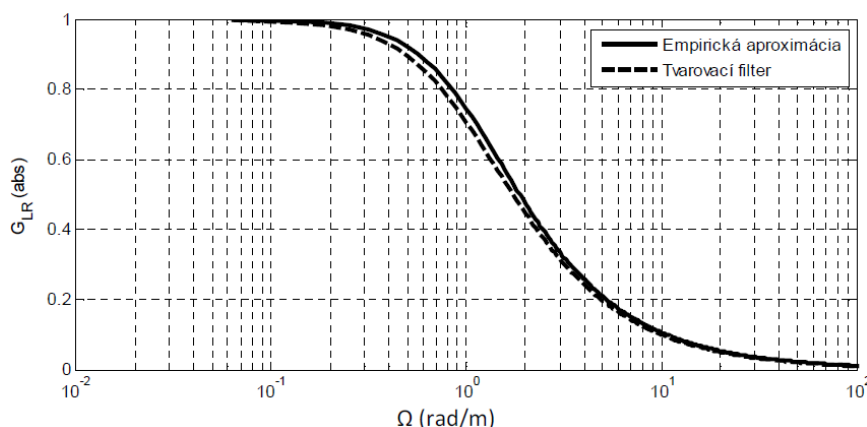
Tab. 2: Hodnoty parametrov empirickej funkcie [4]

Typ vozovky	k [-]	p [-]	a [-]	Ω [m^3/rad]
Poľné cesty	2	0,5	0,94	0,99
Hlavné cesty - Asfalt	2,2	0,88	0,97	0,97
Cesta pre motorové vozidla - Asfaltbeton	2,1	0,45	0,6	0,6
Cesta pre motorové vozidla - Cementbeton	2	0,47	0,96	0,96

Na obrázku č. 7 sú zobrazené priebehy empirickej funkcie (6) pre motorové vozidlo a zároveň frekvenčná odozva tvarovacej funkcie (7), kde hodnota konštanty $c_{LR}(v) \approx 2\pi \cdot v$ a v predstavuje prejazdovú rýchlosť vozidla v (m/s).

$$G_{LR}(s) = \frac{1}{c_{LR}(s) + 1} \quad (7)$$

Podľa obrázku č. 7 môžeme usúdiť, že získane priebehy sú si veľmi podobné a teda, tvarovací filter prvého rádu dostatočne presne aproximuje koreláciu nerovnosti medzi pravou a ľavou stopou vozovky, vzhľadom na meniacu sa dĺžkovú frekvenciu nerovnosti.



Obr. 7: Priebeh empirickej koherenčnej funkcie pre ľavú a pravú stopu vozovky a odozva náhradného tvarovacieho filtra

K uvedenému treba však dodať, že pomerne často sa na cestách môžeme stretnúť i s budením, kedy je karoséria vozidla značne vybudzovaná najmä v smere kmitania okolo pozdĺžnej osi vozidla. Vtedy nerovnosti ľavej a pravej stopy vozovky už pri veľmi nízkych vlnových číslach vzájomne nekorelujú a v najnepriaznivejšom prípade sú v protifáze.

4 Záver

Z hľadiska štatistiky považujeme vozovku za náhodný proces so strednou hodnotou blížiacou sa k nule. Hustota rozloženia pravdepodobnosti výskytu vybraných hodnôt profilu vozovky korešponduje s Gaussovskou funkciou. Model vozovky uvedený v príspevku je možné implementovať do simulačného modelu vozidla do ktorého by vstupovali štyri aktívne sily a štyri stochastické budenia v podobe rýchlosti zmeny nerovnosti vozovky. Takto zhotovený model sa dá použiť pre výpočet matice optimálneho regulátora a stacionárneho Kalmanovho filtra. Vyjadrením previazanosť medzi ľavou a pravou stopou vozovky sa zredukuje počet vstupov do modelu na polovicu zo 4 na 2 vstupy. Numerický model vozovky, modely prekážok ako aj prepojenia s numerickým modelom vozidla boli vytvorené v softvérovom prostredí MATLAB.

References

- [1] Bogdanoff, J. L., Cote, L. J. et. al.: Introduction to a statistical theory of land locomotion – II ground roughness, *Journal of Terramechanics*, 2, pp. 17-27, 1965.
- [2] Houbolt, J. C., Walls, J. C. et al.: On spectral analysis of runway roughness and loads developed during taxiing, *Technical note 3484*, Langley Aeronautics Laboratory, National Advisory Committee for Aeronautics, Langley Field, VA, 1955.
- [3] Zuščík, M.: Návrh semiaktívneho odpruženia vozidla. [Dizertačná práca]. – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Strojnícka fakulta; Ústav aplikovanej mechaniky a mechatroniky. – Vedúci práce: doc. Ing. Miloš Musil, CSc. Bratislava: Sjf STU, 2010.
- [4] Zuščíková, M., Belavý, C.: H controller design for active suspension system. In *Process Control 2011 : Proceedings of the 18th International Conference*. Tatranská Lomnica, Slovakia, 14.-17.6. 2011. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2011, s. 394--399. ISBN 978-80-227-3517-9.