

Martin Decký *

DYNAMICKÉ METÓDY HODNOTENIA NEROVNOSTÍ CESTNÝCH VOZOVIEK

COMPARISON OF DYNAMIC METHODS OF ROAD PAVEMENT EVENNESS EVALUATION

Článok prezentuje prehľad dynamických metód používaných v Slovenskej republike na hodnotenie pozdĺžnych nerovností cestných vozoviek. Podrobne sa tu opisujú metódy hodnotenia pomocou miery nerovnosti C a medzinárodného indexu nerovnosti (IRI).

Meracie zariadenie JP VŠDS (jednokolesový prívies Žilinskej univerzity), ktoré hodnotí parameter C, bolo skonštruované na dynamickom princípe DMS (dvojhmotová meracia sústava). Spôsob hodnotenia pozdĺžnych nerovností pomocou tohto parametra bol vypracovaný na základe teórie stacionárnych procesov.

Porovnaniu reálnych priebehov pozdĺžnych nerovností hodnotených zariadeniami JP VŠDS, Profilograph a pôvodnou metódou hodnotenia IRI je venovaný záver príspevku.

1. Analytický popis pozdĺžnych nerovností cestných vozoviek

Analytické vyjadrenie priestorovej nerovnosti cestnej vozovky je problém značne zložitý. Preto je účelné zjednodušiť priestorový problém na dvojrozmerný a hodnotiť samostatne priečne a pozdĺžne nerovnosti.

Pri vlastnom vyjadrení pozdĺžnych nerovností je potrebné vychádzať z najjednoduchšieho prípadu a to, že v smere jazdy jednej stopy vozidla je priebeh výšok nerovností harmonický (sinusoidálny).

$$h(t) = h_o \cdot \sin\left(2\pi \frac{V}{L} t\right) \equiv h_o \cdot \sin(2\pi f t) \equiv h_o \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

kde: h_o - amplitúda nerovnosti (m)
 L - dĺžka vlny nerovnosti (m)
 v - rýchlosť (m.s⁻¹)
 t - čas (s)
 f - časová frekvencia (s⁻¹)
 ω - časová kruhová frekvencia (rad.s⁻¹)

V skutočnosti sa s harmonickým priebehom nerovností na vozovke stretávame len výnimočne. Skutočné povrchy vozoviek

The paper presents the review of dynamic methods of road pavement evenness evaluation used in the Slovak Republic. The principles of assessment by parameters C and IRI (International Roughness Index) are detailed here.

The measuring set called the Single-Wheel Vehicle of the University of Žilina (JP VŠDS), which appreciates parameter C has been designed on the DMS (double-mass measuring set) dynamic principle. The design of this system pavement assessment in term of longitudinal unevenness was realised for a consideration stationary random process.

The conclusion of our paper is devoted to the comparison of longitudinal unevenness evaluated by our equipment, measuring vehicle „Profilograph“ (IRI) and original parameter IRI.

1. Analytical description of pavement longitudinal unevenness

An analytical description of spatial pavement unevenness is a very complicated problem. On this account, it is advisable to supply a spatial problem by a two-dimensional one and to evaluate separately transversal and longitudinal unevenness. In the most elementary case, a harmonic sinusoidal form in one trail, we can express a longitudinal unevenness in time domain by equation (1).

$$h(t) = h_o \cdot \sin\left(2\pi \frac{V}{L} t\right) \equiv h_o \cdot \sin(2\pi f t) \equiv h_o \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

where: h_o - unevenness amplitude (m)
 L - unevenness wavelength (m)
 v - wheel velocity (m.s⁻¹)
 t - time (s)
 f - time frequency (s⁻¹)
 ω - time angular frequency (rad.s⁻¹)

The harmonic process of longitudinal unevenness is rare and real pavements have an unevenness of various wavelength and

* Dr. Ing. Martin Decký
 Department of Highway Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina,
 e-mail decky@fstav.utc.sk

majú profil nerovnosti neusporiadaný, kde nerovnosti o rôznych vlnových dĺžkach sú na seba superponované a na seba nadväzujú. V zmysle matematickej štatistiky môžeme tieto procesy považovať za náhodné.

Pre technické aplikácie je dôležité, aby náhodné procesy nerovností vykazovali stacionárne ergotické vlastnosti. Podmienku stacionarity zabezpečíme vhodnou voľbou posudzovaného úseku - homogénneho z hľadiska stavebného a degradačného.

Každý centrováný stacionárny ergotický náhodný proces môžeme charakterizovať pomocou korelačnej funkcie, resp. spektrálnou hustotou. Korelačnú funkciu $K_h(\lambda)$ môžeme v lineárnej doméne pre tento typ procesov vyjadriť vo forme

$$K_h(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [h_1(l) - E_h] \cdot [h_2(l - \lambda) - E_h] \cdot f_2(h_1, h_2) dh_1 \cdot dh_2 \quad (2)$$

kde: λ - dĺžkové oneskorenie (s),
 E_h - očakávaná stredná hodnota nerovností; $E_h = 0$,
 $h(l)$ - náhodná nerovnosť,
 $f_2(h_1, h_2)$ - združená hustota pravdepodobnosti

Náhodné nerovnosti spočítané ako rozdiel teoretického a skutočného profilu môžu byť kvantifikované prostredníctvom normovanej korelačnej funkcie $\rho_h(\lambda)$. Pre náš spôsob hodnotenia musíme poznať výšky pozdĺžneho profilu každých 25 cm.

$$\rho_h(\lambda) = \frac{K_h(\lambda)}{D_h} \quad (3)$$

kde: D_h - disperzia náhodných nerovností

Normovaná korelačná funkcia 500 m úseku cesty v Čičmanoch je uvedená na obr. 1

amplitude. These processes can be considered random from the point of view of mathematical statistics.

An important requirement of technical applications is a fulfilment of stationary and ergodic premise. This imposition must be provided by the appropriate selection of evaluated road sections which are homogenous with regards to construction and degradation conditions.

Every centred stationary random process can be characterised by a correlation function or power spectral density. Correlation function $K_h(\lambda)$, for this type of process, is expressed in linear domain by equations 2:

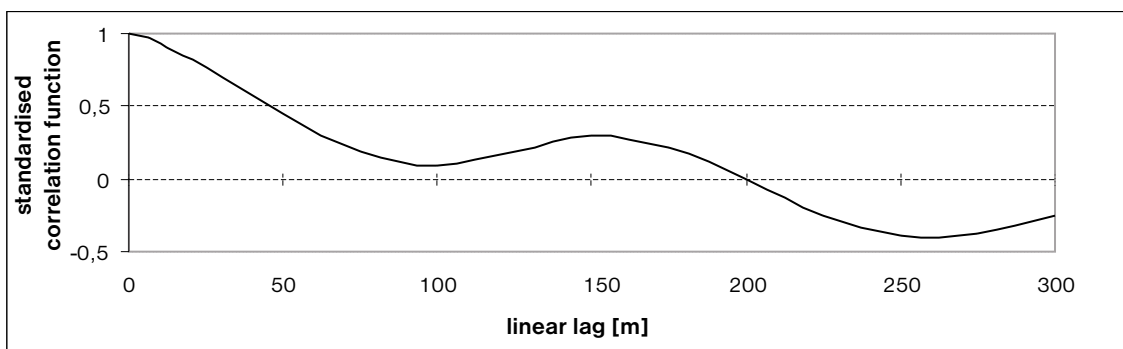
where: λ - linear lag (m),
 E_h - expected value of stochastic unevenness; $E_h = 0$,
 $h(l)$ - stochastic unevenness,
 $f_2(h_1, h_2)$ - combination density of expectation

Stochastic unevenness is computed as the difference between the real and theoretical profile. We must identify elevations of the longitudinal profile per 0.25 m. Longitudinal unevenness is evaluated through the standardised correlation function $\rho_h(\lambda)$:

$$\rho_h(\lambda) = \frac{K_h(\lambda)}{D_h} \quad (3)$$

where: D_h - dispersion of an stochastic unevenness

The standardised correlation function of 500 m road section Čičmany can be seen in Fig. 1.



Obr. 1. Normovaná korelačná funkcia náhodných nerovností
 Fig. 1 The standardised correlation function of an stochastic unevenness

Pri riešení dynamických úloh spojených s pohybom vozidla po nerovnostiach vozovky je výhodnejšie používať výkonovú spektrálnu hustotu $S_h(\Omega)$, ktorá je s KF viazaná Viener-Chinčinovým vzťahom:

For our purpose of unevenness assessment, it is more appropriate to use power spectral density $S_h(\Omega)$, which we can express from correlation function by means of the Viener-Chinčin equation:

$$S_h(\Omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} K_h(\lambda) \cdot \cos(\Omega\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

kde: Ω - držková kruhová frekvencia [rad.m⁻¹],

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi}{L}; \quad (5)$$

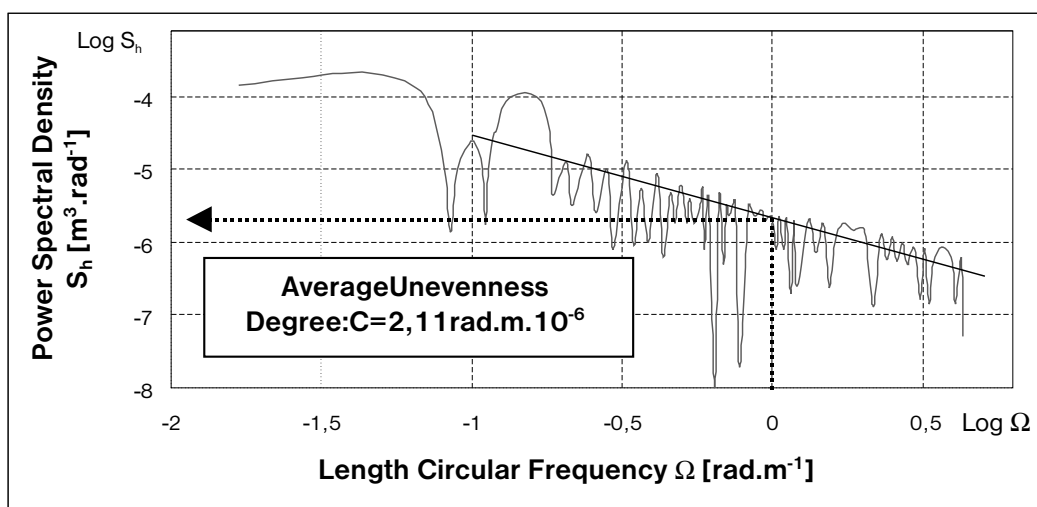
L - dĺžka vlny [m]

$$S_h(\Omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} K_h(\lambda) \cdot \cos(\Omega\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

where: Ω - length circular frequency [rad.m⁻¹],

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi}{L}; \quad (5)$$

L - unevenness wavelength [m]



Obr. 2. Výkonová spektrálna hustota náhodných nerovností 500 m úseku cesty v Čičmanoch
Fig. 2 The power spectral density of an stochastic unevenness

Na základe teórie stacionárnych náhodných procesov bol vypracovaný systém hodnotenia cestných vozoviek z hľadiska pozdĺžnych nerovností podľa parametra C, princíp ktorého je uvedený v kap. 2.

2. Hodnotenie pozdĺžnych nerovností prostredníctvom parametra C

Miera nerovnosti C cestného úseku ľubovoľnej dĺžky je počítaná podľa vzťahu (6), ktorý bol získaný z [1] modifikáciou pre náš spôsob merania rýchlosti.

$$C = \frac{D_y}{I \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_i} \quad (6)$$

kde: D_y - rozptyl výstupného signálu (m².s⁻⁴)
 I - parameter dynamického prenosu (rad⁻¹.s⁻³)
 C - miera nerovností (rad.m)
 v_i - diskkrétne hodnoty rýchlostí merania, $i = 1, 2, \dots, n, \dots, N$ (m.s⁻¹)

The design of a system pavement assessment from the point of view of longitudinal unevenness was realised for a consideration stationary random process and principle. This design is published in section 2.

2. Assessment of unevenness measurements by parameter C

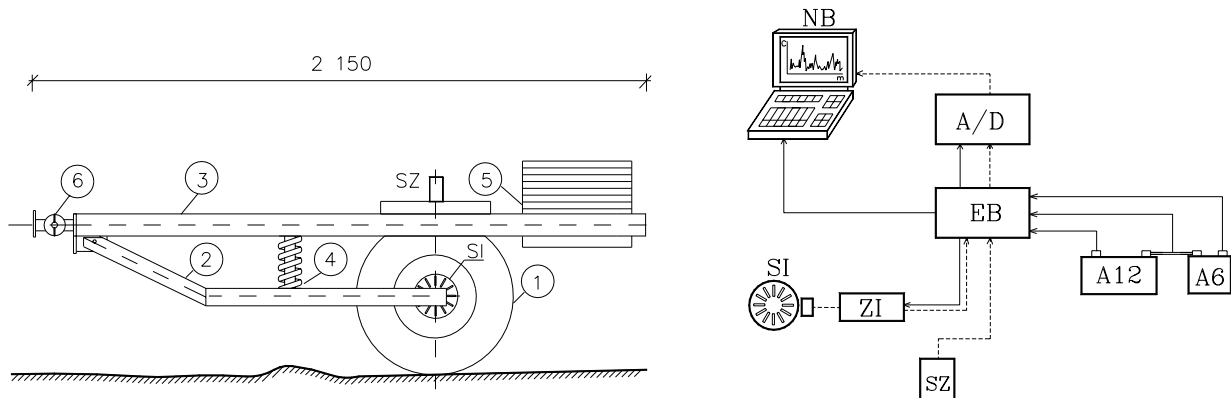
The unevenness degree „C“ of the evaluated road section is expressed from the relation according to [1], which was modified for our mode of speed measurements.

$$C = \frac{D_y}{I \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_i} \quad (6)$$

where: D_y - dispersion of an output signal (m².s⁻⁴)
 I - parameter of a dynamic transfer (rad⁻¹.s⁻³)
 C - unevenness degree (rad.m)
 v_i - digital values of a measured velocity, $i = 1, 2, \dots, n, \dots, N$ (m.s⁻¹)

Jednokolesový prives Vysokej školy dopravy a spojov v Žiline (JP VŠDS) je skonštruovaný na princípe DMS (dynamická - dvojmotová meracia sústava) a predstavuje model štvrtiny osobného automobilu [2]. Jeho mechanický model a základné časti sú znázornené na obr. 3.

Our measuring set called the Single-Wheel Vehicle of the University of Žilina (Slovak abbr. JP VŠDS) has been designed on the DMS (double-mass measuring set) principle [2]. This equipment represents a model of a quarter of the passenger vehicle and its basic parts are presented in Fig 3.



Obr. 3. Schéma zariadenia JP VŠDS s meracou a vyhodnocovacou aparátúrou
Fig. 3 A scheme of the JP VŠDS with scanning and assessment equipment

Naša meracia zostava musí byť kalibrovaná na cestných úsekoch dĺžky 50 m, u ktorých poznáme výšky pozdĺžneho profilu každých 250 mm. Určenie miery nerovnosti vybraného kalibračného úseku je prezentované v kap. 1 (rovnice 2-5, obr. 1-2)

Our measuring set must be calibrated on road sections of length 500 m which have measured profile elevations at constant interval 250 mm. Determination of an unevenness parameter of a selected calibrated section is presented in chapter 1 (equations 2-5, Fig. 1-2).

Meracia a vyhodnocovacia zostava umožňujúca snímanie, záznam, vyhodnocovanie a archiváciu dynamickej odozvy pozdĺžnych nerovností pozostáva z nasledovných hlavných častí:

The measuring set enables the scanning, recording, assessment and storing of dynamic responses of longitudinal unevenness. It consists of the following main parts:

- 1 - predné koleso Š 120
- 2 - spodný rám
- 3 - horný rám
- 4 - pružina a teleskopický tlmič
- 5 - vyvažovacia záťaž
- 6 - Kardanov kĺb
- SZ - snímač zrýchlení
- A/D - analógovo-digitálny prevodník
- NB - notebook 386 SX
- SI, ZI - snímač a zapisovač impulzov
- EB - energetický blok
- A12 and A6 - akumulátory + 12 V + 6 V

- 1 - front wheel with a S 120 charge
- 2 - bottom frame
- 3 - upper frame
- 4 - spring and telescopic shock absorber S 120
- 5 - balancing load
- 6 - cardan joint
- SZ - acceleration transducer
- A/D - analog-to-digital convertor
- NB - notebook 386 SX
- SI, ZI - pulse amplifier and pulse counter
- EB - power block
- A12 and A6 - accumulator + 12 V + 6 V

Kritériá pre hodnotenie pozdĺžnych nerovností boli určené na základe teórie náhodných funkcií a štatistickej dynamiky pri zohľadnení ich pôsobenia na vodičov a cestujúcich. Používané kritériá v tab. 1 sú uvedené v zmysle [6] a boli odvodené v [1].

To determine the criteria for an unevenness assessment, a theory of random functions and statistical dynamics is used, paying attention to the influence on the vehicle crew and influence on passengers ([1] - used criteria, and [3] - our change in Tab. 1).

Zmena klasifikačnej stupnice, prezentovaná v tab. 1, bola teoreticky spracovaná v [3] pričom jej vhodnosť bola overená celým radom experimentálnych meraní.

Results of many experimental measurements have been used for the purpose of determining of the unevenness criteria, too. The change of a qualification scale of the longitudinal unevenness can be seen in Table 1.

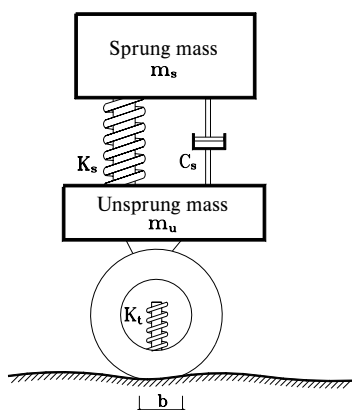
Klasifikačná škála pozdĺžnych nerovností
cestných vozoviek - parameter C

Tab. 1

Klasifikačný stupeň		Klasifikačné rozhrania parametra C (rad.m.10 ⁻⁶)			
Úroveň	Názov	Diaľnice		Cesta a miestne komunikácie	
		používané	zmena	používané	zmena
I.	veľmi kvalitná	< 2	< 1	< 5	< 2
II.	kvalitná	2 - 5	1 - 2	5 - 10	2 - 5
III.	málo kvalitná	5 - 10	2 - 5	10 - 20	5 - 10
IV.	nekvalitná	10 - 20	5 - 10	20 - 50	10 - 20
V.	nevhodná pre premávku	> 20	> 10	> 50	> 20

3. International Roughness Index - IRI

Index IRI je získaný matematicky použitím simulácie modelu štvrtiny osobného vozidla uvedeného na obr. 4 [4].



Obr. 4. Referenčný model štvrtiny osobného vozidla
Fig. 4 The Reference Quarter Car Simulation

Tento model možno matematicky popísať pomocou dvoch diferenciálnych rovníc druhého rádu:

$$\ddot{z}_s \cdot m_s + C_s \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s \cdot (z_s - z_u) = 0 \quad (7)$$

$$\ddot{z}_s \cdot m_s + m_u \cdot \ddot{z}_u + k_t \cdot z_u = k_t \cdot y \quad (8)$$

Po úprave dostávame:

$$\ddot{z}_s + C \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_2 \cdot (z_s - z_u) = 0 \quad (9)$$

$$\ddot{z}_s + u \cdot \ddot{z}_u + k_1 \cdot z_u = k_1 \cdot y \quad (10)$$

kde:

m_s, m_u - hmotnosti odpruženej a neodpruženej hmoty [kg]

Qualification scale of the road pavement
longitudinal unevenness - parameter C

Table 1

Qualification degree		Parameter C (rad.m.10 ⁻⁶)			
Level	Quality name	Highways		Road and urban roads	
		used criteria	our change	used criteria	our change
I.	Excellent	< 2	< 1	< 5	< 2
II.	Good	2 - 5	1 - 2	5 - 10	2 - 5
III.	Poor	5 - 10	2 - 5	10 - 20	5 - 10
IV.	Very poor	10 - 20	5 - 10	20 - 50	10 - 20
V.	Unsuitable for traffic	> 20	> 10	> 50	> 20

3. International Roughness Index - IRI

Parameter IRI is obtained using the Reference Quarter Car Simulation (RQCS) according to [4] and Fig. 4.

$$k_1 = k_t/m_s = 653 \text{ s}^{-2}$$

$$k_2 = k_s/m_s = 63,3 \text{ s}^{-2}$$

$$u = m_u/m_s = 0,15$$

$$C = C_s/m_s = 6,00 \text{ s}^{-1}$$

This model is mathematically defined by two second-order differential equations:

$$\ddot{z}_s \cdot m_s + C_s \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s \cdot (z_s - z_u) = 0 \quad (7)$$

$$\ddot{z}_s \cdot m_s + m_u \cdot \ddot{z}_u + k_t \cdot z_u = k_t \cdot y \quad (8)$$

This system we can express:

$$\ddot{z}_s + C \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_2 \cdot (z_s - z_u) = 0 \quad (9)$$

$$\ddot{z}_s + u \cdot \ddot{z}_u + k_1 \cdot z_u = k_1 \cdot y \quad (10)$$

where:

m_s, m_u - weight of the sprung mass and the unsprung mass [kg]

k_s, k_t - pérové konštanty pružiny a pneumatiky [kN.m⁻¹]
 C_s - súčiniteľ lineárneho tlmenia tlmiča [kN.s.m⁻¹]
 z_s, z_u - výchylky odpruženej a neodpruženej hmoty [m]
 $\dot{z}_s = dz_s/dt$ - vertikálna rýchlosť neodpruženej hmoty [m.s⁻¹]
 $\dot{z}_u = dz_u/dt$ - vertikálna rýchlosť neodpruženej hmoty [m.s⁻¹]
 $\ddot{z}_s = d^2z_s/dt^2$ - vertikálne zrýchlenie odpruženej hmoty [m.s⁻²]
 $\ddot{z}_u = d^2z_u/dt^2$ - vertikálne zrýchlenie neodpruženej hmoty [m.s⁻²]
 $y(t)$ - vstupný profil vozovky [m]

k_s, k_t - constant of the linear spring and the tire [kN.m⁻¹]
 C_s - coefficient of linear damper [kN.s.m⁻¹]
 z_s, z_u - displacement of the sprung and he unsprung mass [m]
 $\dot{z}_s = dz_s/dt$ - vertical velocity of the sprung mass [m.s⁻¹]
 $\dot{z}_u = dz_u/dt$ - vertical velocity of the unsprung mass [m.s⁻¹]
 $\ddot{z}_s = d^2z_s/dt^2$ - vertical acceleration of the sprung mass [m.s⁻²]
 $\ddot{z}_u = d^2z_u/dt^2$ - vertical acceleration of the unsprung mass [m.s⁻²]
 $y(t)$ - profile elevation input [m]

Rovnice (7) - (10) platia pre časovú doménu. Vzhľadom na riešenia uvedeného modelu v lineárnej doméne, poznáme výšky skutočného pozdĺžneho profilu každých 25 cm, musíme nájsť vektor geometrických derivácií $Z^T(x)(i) = (z_{1i}, z_{2i}, z_{3i}, z_{4i})$ pomocou nasledovných vzťahov:

Equations (7) - (10) apply for the temporal domain. We solve this model in linear domain, know real longitudinal profile per 0,25 m, whereupon we must find a vector of spatial derivations - $Z^T(x)(i) = (z_{1i}, z_{2i}, z_{3i}, z_{4i})$. The values of this vector are calculated as:

$$\dot{z}'_{s,i} = s_{11} \cdot \dot{z}'_{s,i-1} + s_{12} \cdot \dot{z}''_{s,i-1} + s_{13} \cdot \dot{z}'_{u,i-1} + s_{14} \cdot \dot{z}''_{u,i-1} + r_1 \cdot y'_i \quad (11)$$

$$\dot{z}''_{s,i} = s_{21} \cdot \dot{z}'_{s,i-1} + s_{22} \cdot \dot{z}''_{s,i-1} + s_{23} \cdot \dot{z}'_{u,i-1} + s_{24} \cdot \dot{z}''_{u,i-1} + r_2 \cdot y'_i \quad (12)$$

$$\dot{z}'_{u,i} = s_{31} \cdot \dot{z}'_{s,i-1} + s_{32} \cdot \dot{z}''_{s,i-1} + s_{33} \cdot \dot{z}'_{u,i-1} + s_{34} \cdot \dot{z}''_{u,i-1} + r_3 \cdot y'_i \quad (13)$$

$$\dot{z}''_{u,i} = s_{41} \cdot \dot{z}'_{s,i-1} + s_{42} \cdot \dot{z}''_{s,i-1} + s_{43} \cdot \dot{z}'_{u,i-1} + s_{44} \cdot \dot{z}''_{u,i-1} + r_4 \cdot y'_i \quad (14)$$

Systém rovníc (11) - (14) môžeme vyjadriť v maticovej forme pomocou (15):

$$Z(x)_{(i)} = \underline{S} \cdot Z(x)_{(i-1)} + R \cdot y'_{(i)} \quad (15)$$

kde:

$$Z^T(x)_{(i)} = (z_{1,i}; z_{2,i}; z_{3,i}; z_{4,i}) = (z'_{s,i}; z''_{s,i}; z'_{u,i}; z''_{u,i}) = (dz_{s,i}/dx; d^2z_{s,i}/dx^2; dz_{u,i}/dx; d^2z_{u,i}/dx^2)$$

- vektor geometrických derivácií (16)

\underline{S} - stavová prechodová matica koeficientov 4 x 4,

R - vektor parciálnej odozvy 1 x 4,

$y'_{(i)}$ - smernica vstupného profilu,

i - aktuálny krok, i-1 - predchádzajúci krok

The presented system can be expressed in the following matrix form:

$$Z(x)_{(i)} = \underline{S} \cdot Z(x)_{(i-1)} + R \cdot y'_{(i)} \quad (15)$$

where:

$$Z^T(x)_{(i)} = (z_{1,i}; z_{2,i}; z_{3,i}; z_{4,i}) = (z'_{s,i}; z''_{s,i}; z'_{u,i}; z''_{u,i}) = (dz_{s,i}/dx; d^2z_{s,i}/dx^2; dz_{u,i}/dx; d^2z_{u,i}/dx^2)$$

- vector of spatial derivations (16)

\underline{S} - state transition matrix 4 x 4,

R - partial response matrix 1 x 4

$y'_{(i)}$ - slope input

i - present step, i-1 - previous time step

Systém diferenciálnych rovníc (7) - (10) môžeme vyjadriť nasledovnou maticovou formou:

$$Z(t) = \underline{A} \cdot K(t) + B \cdot y(t) \quad (17)$$

kde:

$$Z^T(t) = (\dot{z}_s, \dot{z}_s, \dot{z}_u, \dot{z}_u) = (dz_s/dt, d^2z_s/dt^2, dz_u/dt, d^2z_u/dt^2)$$

- vektor časových derivácií

$K^T(t) = (z_s, \dot{z}_s, z_u, \dot{z}_u)$ - pomocný vektor časových derivácií

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -C & K_2 & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ K_2/u & C/u & -(K_1 + K_2)/u & -C/u \end{bmatrix} \quad (18)$$

The differential equations (7) - (10) can be expressed in the following matrix form

$$Z(t) = \underline{A} \cdot K(t) + B \cdot y(t) \quad (17)$$

where:

$$Z^T(t) = (\dot{z}_s, \dot{z}_s, \dot{z}_u, \dot{z}_u) = (dz_s/dt, d^2z_s/dt^2, dz_u/dt, d^2z_u/dt^2)$$

- vector of temporal derivations

$K^T(t) = (z_s, \dot{z}_s, z_u, \dot{z}_u)$ - additive vector of temporal derivations

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -C & K_2 & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ K_2/u & C/u & -(K_1 + K_2)/u & -C/u \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_1/u \end{bmatrix} \quad (19)$$

Pre konštantnú dĺžku kroku, na ktorom predpokladáme konštantnú $y'_{(i)}$, môžu byť matice \underline{S} a R vypočítané z \underline{A} a B matíc:

$$\underline{S} = e^{\underline{A} \cdot dt} \quad (20)$$

$$R = \underline{A}^{-1} \cdot (\underline{S} - I) \cdot B \quad (21)$$

kde:

$$dt(s) = dx(m) \cdot 3600(s/h) \cdot 0,001(km/m) / v(km/h) \quad (22)$$

I - jednotková matica typu 4 x 4

Na základe vzťahov (7)-(22) bol vytvorený v Microsoft Excel 97 program pre hodnotenie pozdĺžnych nerovností na základe známeho pozdĺžneho profilu. Uvedený program je v súlade s pôvodnou metódikou [4] a pozostáva z nasledovných krokov:

- výpočet lokálnych smerníc (spádov)

Smernica vstupného profilu je počítaná pre každý meraný bod (musíme poznať výšky pozdĺžneho profilu v konštantnej vzdialenosti - najčastejšie 25 cm)

$$y'_{(i)} = (y_{(i-1)} - y_{(i)}) / dx, \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (23)$$

kde:

$y'_{(i)}$ - vyrovnaná lokálna smernica vstupného profilu

$y_{(i)}$ - výška pozdĺžneho profilu (m)

dx - merací interval $dx = b = 0,25$ m

- výpočet vektora geometrických derivácií vstupného profilu

Pre výpočet štvorzložkového vektora odozvy $Z^T(x)_{(i)} = (z_{1,i}; z_{2,i}; z_{3,i}; z_{4,i}) = (z'_{s,i}; z''_{s,i}; z'_{u,i}; z''_{u,i})$ sa používa vzťah (15):

$$Z(x)_{(i)} = \underline{S} \cdot Z(x)_{(i-1)} + R \cdot y'_{(i)}$$

- určenie opravených lokálnych smerníc (spádov)

V každom kroku i sa výpočtom stanovujú opravené smernice (spády) podľa vzťahu:

$$T_i = (z_{3i} - z_{1i}), \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (24)$$

- výpočet parametra IRI

Index IRI podľa [4] reprezentuje aritmetický priemer smerníc T_i na celom meranom úseku dĺžky L pri počte odčítaní N obr. 5.

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_1/u \end{bmatrix} \quad (19)$$

For a constant length of the step, on which $y'_{(i)}$ is a constant, the \underline{S} and R matrices can be computed from the \underline{A} and B matrices:

$$\underline{S} = e^{\underline{A} \cdot dt} \quad (20)$$

$$R = \underline{A}^{-1} \cdot (\underline{S} - I) \cdot B \quad (21)$$

where:

$$dt(s) = dx(m) \cdot 3600(s/h) \cdot 0,001(km/m) / v(km/h) \quad (22)$$

I - identity matrix 4 x 4

Originally, the program for the valuation of longitudinal was created with Microsoft Excel 97. This program was created following the equations (7)-(22) and it consists of the following steps:

- calculation of profile slopes

The profile slope input is computed for every measuring point (we must know elevations of longitudinal profile per 0,25 m):

$$y'_{(i)} = (y_{(i-1)} - y_{(i)}) / dx, \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (23)$$

where:

$y'_{(i)}$ - smoothed profile slope input

$y_{(i)}$ - elevation of longitudinal profile (m)

dx - measurement interval $dx = b = 0,25$ m

- computation of the vector of spatial derivations $Z(x)_{(i)}$

The computation of vector $Z^T(x)_{(i)} = (z_{1,i}; z_{2,i}; z_{3,i}; z_{4,i}) = (z'_{s,i}; z''_{s,i}; z'_{u,i}; z''_{u,i})$ is realised by equation (15):

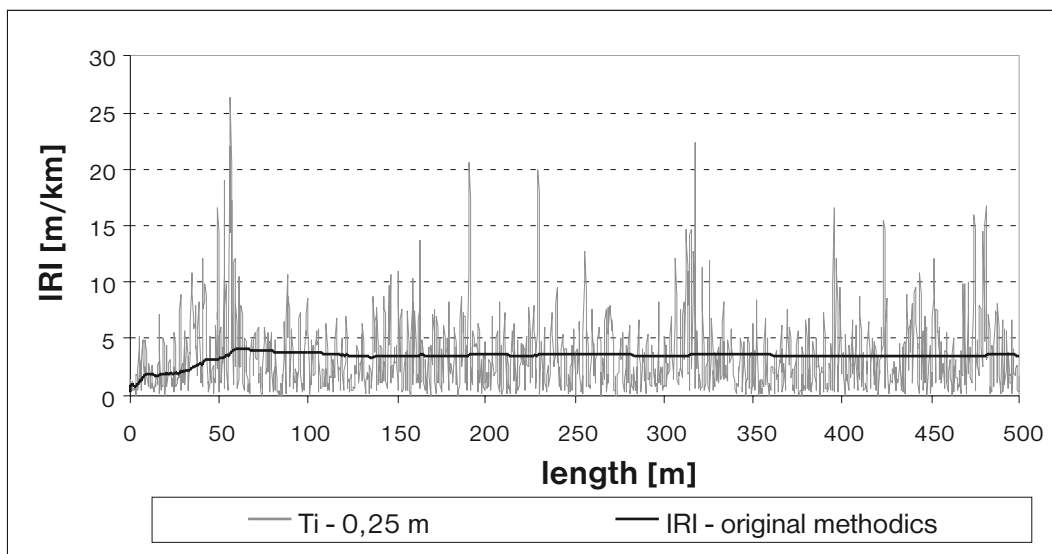
$$Z(x)_{(i)} = \underline{S} \cdot Z(x)_{(i-1)} + R \cdot y'_{(i)}$$

- determination of the corrected profile slope

$$T_i = (z_{3i} - z_{1i}), \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (24)$$

- calculation of the IRI parameter

IRI represents arithmetic average of the corrected slope. Values of parameter IRI can be appreciated for a window of a discretionary length (conveniently 1, 10, 20, 100 m - Fig. 6).



Obr. 5. Priebek opravených lokálnych smerníc - Čičmany máj 1993
Fig. 5 Corrected profile slope per 0.25 m and original parameter IRI - Čičmany May 93

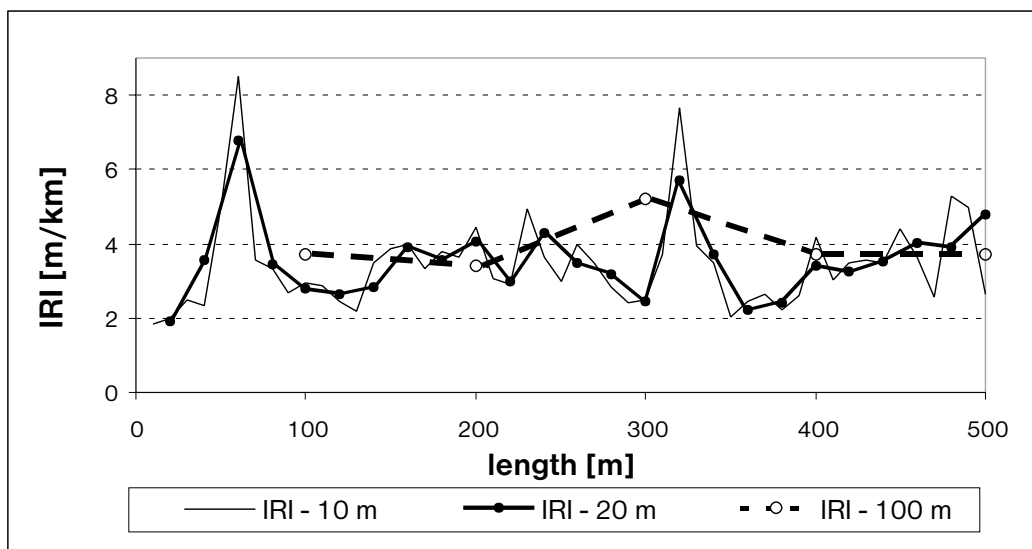
$$IRI = \frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N T_i \quad (25)$$

$$IRI = \frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N T_i \quad (25)$$

V našom programe je možné hodnotiť parameter IRI pre ľubovoľnú dĺžku hodnotiaceho okienka (obyčajne 1, 10, 20, 100 m - obr. 6).

Na obr. 6 je uvedené hodnotenie pozdĺžnych nerovností etalónového úseku Čičmany pre simulovanú rýchlosť 80 km/h a merací interval 25 cm. Čiastkové vyhodnocovacie intervaly (okienka) dĺžky 1, 10, 20 a 100 m sú teoreticky prechádzané za čas 0,045; 0,45; 0,9 a 4,5 s.

This program evaluates the road pavement longitudinal unevenness for the Reference Quarter Car Simulation. The program simulates ride speed 80 km/h and the measurement interval is 0.25m. The evaluation of longitudinal unevenness of the road section Čičmany can be seen in Fig. 6. The single evaluated windows of the length 1, 10, 20, 100 m are theoretically ridden in time 0.045, 0.45, 0.9, 4.5 s.



Obr. 6. Parameter IRI - Čičmany Máj 93
Fig. 6 Parameter IRI - Čičmany May 93

4. Porovnávacie merania zariadení Profilograph a JP VŠDS

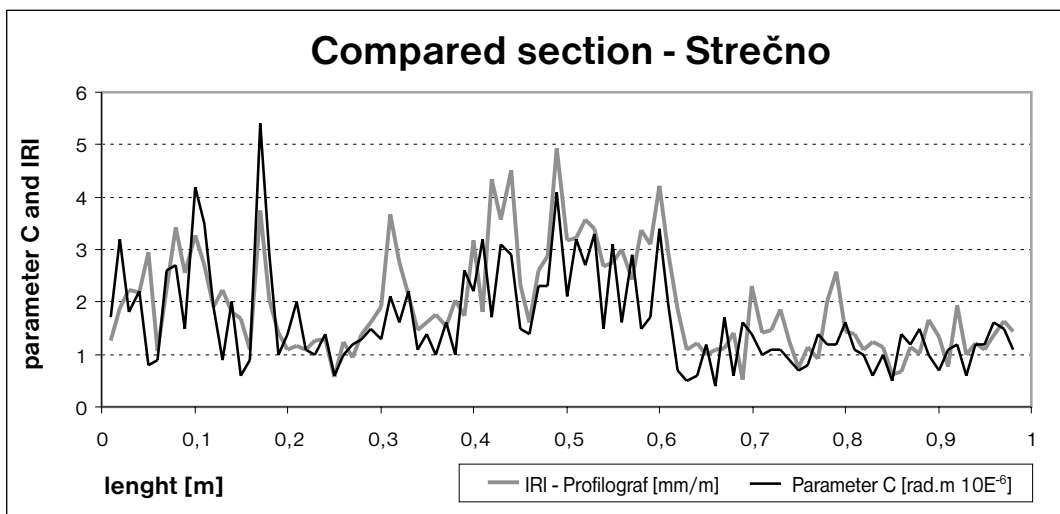
Slovenská správa ciest vlastní meracie vozidlo Profilograph umožňujúce presnú registráciu premenných i nepremenných parametrov cestnej siete.

Profilograph hodnotí pozdĺžne nerovnosti indexom IRI [5] a zariadenie JP VŠDS parametrom miery nerovnosti C.

4. Comparison measurements of the equipment Profilograph, JP VŠDS

Slovak Road Administration owns a measuring vehicle „Profilograph“, which enables an exact registration of the road network's profile and surface condition.

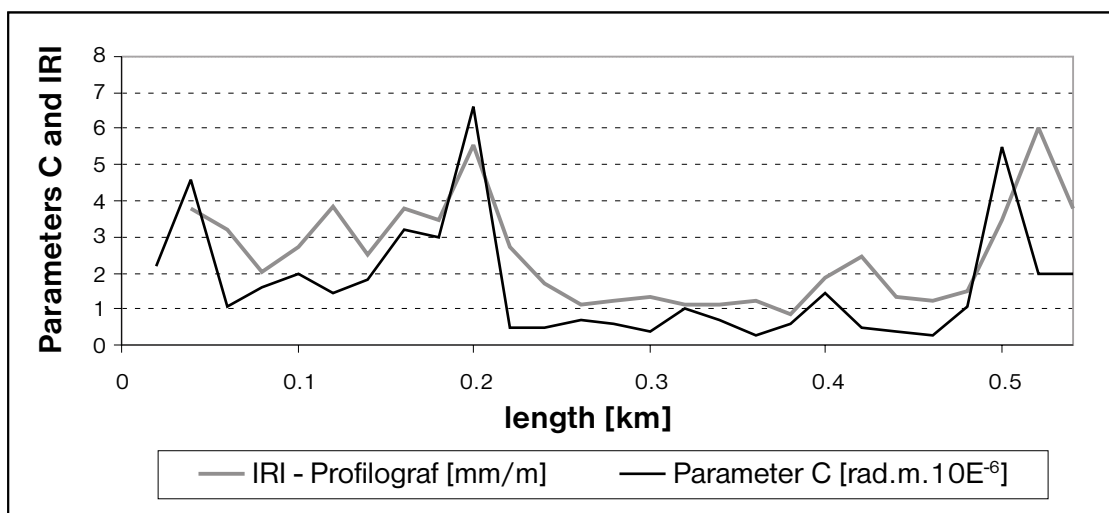
The Profilograph can evaluate longitudinal unevenness in the form of a parameter IRI [5]. Our measuring set produces parameter C.



Obr. 7. Porovnanie parametrov C a IRI pre hodnotiace okienko 10 m - Strečno 30. 10. 96
Fig. 7 A comparison of parameters C and IRI for valuation window 10 m - Strečno 30. 10. 96

Obidve zariadenia hodnotia rovnaký premenný parameter v rôznej forme, a preto by ich výsledky mali byť porovnávané.

Both measuring equipment evaluate the same parameter in a different form, whereupon their results should be compared.

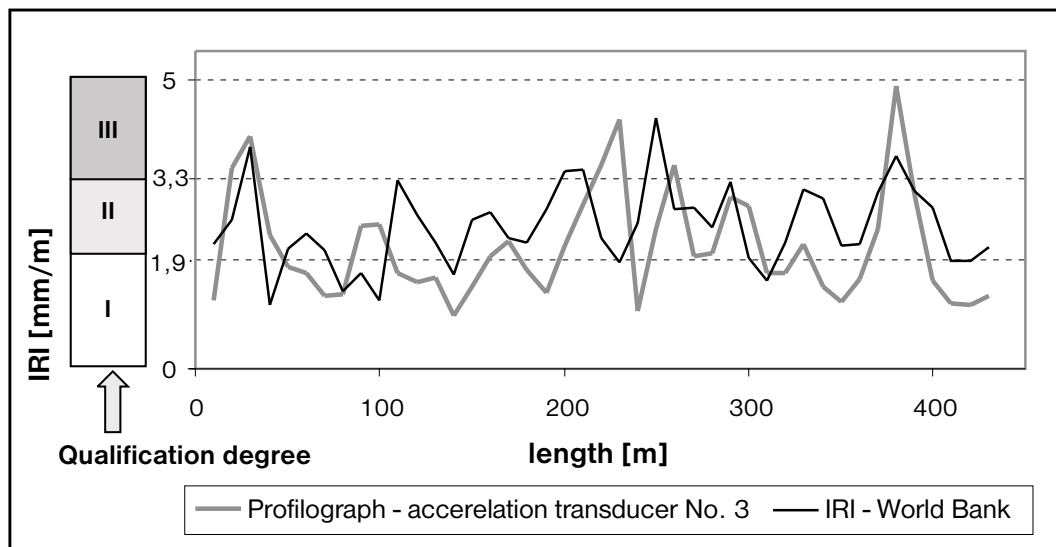


Obr. 8. Porovnanie parametrov C a IRI pre hodnotiace okienko 20 m - Strážov 23. 3. 99
Fig. 8 A comparison of parameters C and IRI for valuation window 20 m - Strážov 23. 3. 99

Rozdiely hodnotených parametrov C a IRI pre okienka dĺžky 10 a 20 m nie sú významné (obr. 6 - 8) a preto môžeme konštatovať ich reálnu kvantifikačnú spôsobilosť.

Na základe prezentovaných skutočností bolo uskutočnené porovnanie hodnôt parametra IRI zisteného Profilografom a našim programom len pre okienko dĺžky 10 m.

The differences between windows of the length 10 and 20 m are not considerable (Fig. 6), therefore, they can be used for real valuation of the road longitudinal unevenness. Following these presented facts, we compared measurements of road longitudinal unevenness evaluated by the „Profilograph“ and the original parameter IRI for window length 10 m- Fig. 8.



Obr. 9. Porovnanie parametrov IRI cesty I/11 pre hodnotiace okienko 10 m - september 1996
Fig. 9 Comparison of the longitudinal unevenness of the road I/11 for window 10 m

Klasifikačná stupnica na obr. 9 bola uvažovaná podľa [6]. Na základe uvedeného porovnania možno predpokladať ekvipolenciu porovnávaných parametrov IRI avšak uvedenú premisu bude potrebné potvrdiť ďalšími meraniami.

5. Záver

Analýzu nerovností cestných vozoviek možno považovať za substanciálnu úlohu v oblasti inžinierskeho diagnostikovania cestnej siete, a preto kvantifikácia pozdĺžnych nerovností cestných vozoviek tvorí fundament úspešnej implementácie systémov hospodárenia s vozovkami.

Porovnávanie merania umožnili predbežnú verifikáciu amplitúdovej ekvipolencie dynamických kvantifikačných parametrov pozdĺžnych nerovností cestných vozoviek C a IRI. Na základe hore uvedených skutočností možno konštatovať vhodnosť použitia výsledkov JP VŠDS pre účely systému hospodárenia s vozovkami [7], [8].

Literatúra:

- [1] PROCHÁDZKA, M., ŠPRINC, J., KROPÁČ, O.: Teoretické základy klasifikácie nerovností vozovok. Silniční Obzor, 7/1980.

Following Fig. 9, we can assume that compared parameters IRI are equivalent. This premise will have to be verified by the next measurements and comparisons. The qualification scale of the parameter IRI in Fig. 9 was used according to [6].

5. Conclusions

Analysis of road pavement unevenness can be considered as one of the „first aid“ systems to the highway engineer in the survey of road networks and maintenance diagnosis, whereupon we can state that the quantification of the longitudinal unevenness is an essential attribute to the implementation of any Pavement Management System.

The comparison measurements enabled the preliminary verification of the unification of road longitudinal unevenness qualification scales for the parameters IRI and C. Therefore, the results detected by the JP VŠDS can be used for Pavement Management System [7], [8].

References:

- [1] PROCHÁDZKA, M., ŠPRINC, J., KROPÁČ, O.: Teoretické základy klasifikácie nerovností vozovok. Silniční Obzor, 7/1980.

- [2] ČOREJ, J., DECKÝ, M.: Hodnotenie nerovností vozoviek dvojmotovou meracou sústavou JP VŠDS. Silniční obzor 4/1996.
- [3] DECKÝ, M.: Hodnotenie pozdĺžnych nerovností cestných vozoviek meracou sústavou VŠDS. Dizertačná práca, Žilina apríl 1996.
- [4] SAYERS - GILLESPIE - QUEIROZ: International Experiment to Establish Correlation and Standard Calibration Methods for Road Roughness Measurements . Report to the World Bank, Michigan 1989.
- [5] ŠEDIVÝ, J., JELÍNEK, S., BENKO, Z.: Diagnostika vozoviek a stav cestnej siete v Slovenskej republike. Kvalita, normy a technické predpisy v cestnom staviteľstve, seminár s medzinárodnou účasťou, Žilina 4. - 5. 2. 1999.
- [6] ČSN 73 61 75 Měření nerovnosti povrchu vozovek. Český normalizačný inštitut 1995.
- [7] VALÚCH, M.: Systém technológií opráv cestnej vozovky na základe jej technického stavu. Dizertačná práca, Žilina 1996.
- [8] ČELKO, J.: Meranie a hodnotenie nerovností v Systéme hospodárenia s vozovkami. Silniční obzor 8/1998, str. 216-218.

Recenzenti: I. Gschwendt, J. Mikolaj

- [2] ČOREJ, J., DECKÝ, M.: Hodnotenie nerovností vozoviek dvojmotovou meracou sústavou JP VŠDS. Silniční obzor 4/1996.
- [3] DECKÝ, M.: Hodnotenie pozdĺžnych nerovností cestných vozoviek meracou sústavou VŠDS. Dizertačná práca, Žilina apríl 1996.
- [4] SAYERS - GILLESPIE - QUEIROZ: International Experiment to Establish Correlation and Standard Calibration Methods for Road Roughness Measurements . Report to the World Bank, Michigan 1989.
- [5] ŠEDIVÝ, J., JELÍNEK, S., BENKO, Z.: Diagnostika vozoviek a stav cestnej siete v Slovenskej republike. Kvalita, normy a technické predpisy v cestnom staviteľstve, seminár s medzinárodnou účasťou, Žilina 4. - 5. 2. 1999.
- [6] ČSN 73 61 75 Měření nerovnosti povrchu vozovek. Český normalizačný inštitut 1995.
- [7] VALÚCH, M.: Systém technológií opráv cestnej vozovky na základe jej technického stavu. Dizertačná práca, Žilina 1996.
- [8] ČELKO, J.: Meranie a hodnotenie nerovností v Systéme hospodárenia s vozovkami. Silniční obzor 8/1998, str. 216-218.

Reviewed by: I. Gschwendt, J. Mikolaj