

## VÝVOJ ADAPTIVNÍHO INTERAKTIVNÍHO SYSTÉMU PRO ZVÝŠENÍ BEZPEČNOSTI OSÁDKY VOZIDEL A JEHO VYUŽITÍ PRO HODNOCENÍ POVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ VOZOVEK

Jan Kudrna, Jiří Plíhal, Pavel Nedoma, Zdeněk Herda, Petr Kozák<sup>6</sup>

### ABSTRAKT

Metod zabývajících se měřením povrchových parametrů pozemních komunikací je celá řada. Mezi ty základní patří: analýza laserového měření, odhad koeficientu tření z příčného pohybu vozidla, odhad za pomoci modelu vozidla či měření pomocí přidavného kolečka. Z pohledu on-line měření povrchových vlastností pozemní komunikace je velice přínosný odhad za pomoci modelu vozidla, kdy do modelu vstupují měřená data z GPS snímače polohy, akcelerometru, sensoru otáček a přenášeného výkonu na kolech, asisatenčních systémů ABS/ESP a veličiny popisující výkonové parametry motoru.

On board měření povrchových vlastností vozovky pozemní komunikace může výrazně přispět ke zvýšení bezpečnosti silničního provozu. Tento příspěvek popisuje koncept systému vyhodnocujícího součinitel tření a povrchové nerovnosti vozovky na základě dat zaznamenávaných běžnými vozidlovými senzory. Koncept obsahuje dvě na sobě nezávislé části: deterministický model pohybu vozidla a stochastickou analýzu korelací odchylek modelu a povrchových koeficientů na základě dat z testovacích jízd. Prostřednictvím modelu pohybu vozidla je možné odhadovat hodnoty různých veličin, které je možné zpětně měřit za pomoci vozidlových senzorů. Za předpokladu správně kalibrovaného modelu mají být vzniklé odchylky způsobeny nestandardními jízdními podmínkami. K analýze těchto odchylek byla použita data z testovacích jízd, kdy byly povrchové vlastnosti vozovky měřeny speciálními systémy (TRT vozidlo, zařízení HawkEye, GripTester).

### 1. ÚVOD

Stávající hodnocení povrchu pozemní komunikace jsou založena zejména na měření parametrů povrchů vozovek pomocí speciálního vozidla osazeného měřicími přístroji ke stanovení nerovnosti v podélném i příčném profilu (IRI a vyjeté koleje) a protismykových vlastností ( $F_p$ ,  $F_b$ ) a makrotexturu (MPD) nebo pomocí měření na reálných površích lpřípadně v aboratorních podmínkách: protismykové vlastnosti kyvadlem (PTV), makrotextura (MTD), ohlazování kameniva (PV) a ohlazování povrchů a měření tření zařízením Wehner/Schulze apod.). Požadované hodnoty protismykových vlastností a nerovností jsou vázány na nehodovost, pohodlí a ekonomické možnosti společnosti na

---

<sup>6</sup> Prof. Ing. Jan Kudrna, VUT v Brně, FAST Veveří 95 602 00 Brno;

Dr. Ing. Jiří Plíhal, ÚTIA AV ČR, v.v.i. Pod Vodárenskou věží 4, 182 08 Praha 8

Ing. Pavel Nedoma, Ph.D. ŠKODA AUTO a.s., tř. Václava Klementa 869, 293 60 Mladá Boleslav

Ing. Zdeněk Herda ŠKODA AUTO a.s., tř. Václava Klementa 869, 293 60 Mladá Boleslav

Ing. Petr Kozák, VUT v Brně, FAST Veveří 95 602 00 Brno

výstavbu nových pozemních komunikací a na údržbu a opravy stávajících pozemních komunikací.

Dnešní automobilový průmysl osazuje do automobilů systémy, které pomáhají řidiči optimalizovat rozhodování s ohledem na protismykové charakteristiky a na podélné nerovnosti vozovky. Optimalizace dynamických jízdních parametrů (rychlost, akcelerace / decelerace) na základě známých údajů o teplotě, adhezi, topologii pozemní komunikace či výkonových parametrech vozidla, prostřednictvím modelu identifikujícího charakteristické jízdní stavy, může přinést významné úspory v podobě vyšší bezpečnosti osádky vozidla a komfortu jízdy.

Je běžné, že na místa s častými dopravními nehodami, právě z důvodu nepředvídatelně nízkého součinitele tření, složitého vodorovného a výškového vedení pozemních komunikací, se osazují svislé dopravní značení upozorňující řidiče na riziková místa. Jelikož právě na těchto místech dochází k mnohem rychlejšímu snižování součinitele tření účinkem vodorovných sil, a toto snížení protismykových vlastností se v pravidelných cyklech měření objeví pozdě až na základě nehod, na které má vliv jak vedení komunikace a nerovnost, tak i rychle se snižující tření (součinitel  $i$  v létě zejména za mokra se blíží k hodnotám 0,2, které očekává řidič v zimě na sněhu a náledí).

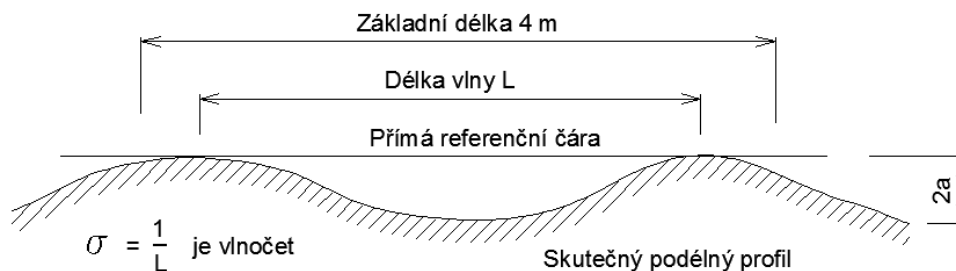
Asistenční systémy osazené do automobilů významně přispívají i v oblasti zvýšení plynulosti dopravy a snížení počtu dopravních nehod zapříčiněných podceněním či nepředvídaností nízkých adhezních podmínek nebo nerovnosti povrchu vozovky, což je zajištěno i zlepšením kvality poskytovaných informací na palubním systému řidiče či automatickým regulačním zásahem do dynamiky pohybu vozidla.

## 2. MĚŘENÍ PODÉLNÉ NEROVNOSTI

Podélná nerovnost je definována svislými rozdíly mezi teoretickým podélným profilem, určeným projektovou dokumentací a skutečným podélným profilem, vzniklým řezem skutečného povrchu svislou rovinou, rovnoběžnou se směrem jízdy vozidla.

Podélné nerovnosti jsou hodnoceny buď výškovým údajem nebo parametrem nerovnosti, odvozeným ze statistické teorie náhodných funkcí nebo stanoveným z odezvy zkušebního systému, jedoucího přes tyto nerovnosti, jedná se o tři parametry:

- maximální hodnota dvojamplitudy nerovnosti pod latí základní délky 4 000 mm položené na povrch vozovky je stanovena v souladu s obrázkem 7;

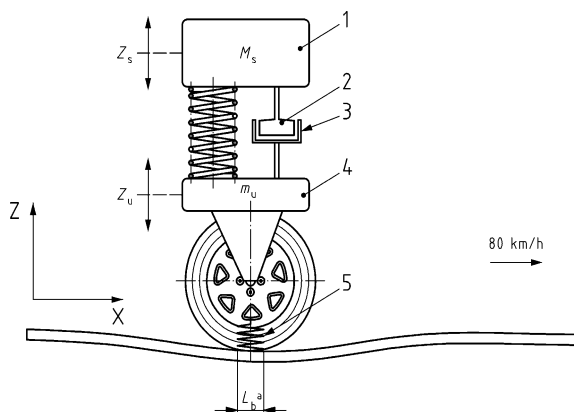


Obr.1 – Stanovení podélné nerovnosti

- detekovat míru nerovnosti  $C$  (10–6 rad·m) a vlnitost  $w$ , stanovené přímkovým vyrovnáním funkce výkonové spektrální hustoty (VSH)  $S_h(\Omega)$  podélné nerovnosti zjištěné přesnou nivelací a vynesené do log-log grafu, přičemž  $C = S_h(1)$  a  $w$  je záporná směrnice vyrovnávající přímky;
- stanovit mezinárodní index nerovnosti, IRI (m/km) je parametr podélné nerovnosti stanovený simulací jízdy dvoumotového referenčního odezvového systému se specifikovanými parametry při rychlosti  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  po podélných nerovnostech.

Měření mezinárodního indexu nerovnosti IRI bylo realizováno pomocí dvouhmotového referenčního odezвовého systému. Podstata zkoušky spočívá ve snímání hodnot svislého zrychlení neodpružené hmoty měřicí nápravy a hodnot svislého zrychlení odpružené hmoty karosérie vozidla (obrázek 2), ze kterých nezávisle na rychlosti pohybu měřicího zařízení je stanoven průběh podélných nerovností vyjádřených mezinárodním indexem nerovnosti IRI.

Jednostopý profilometr s dvouhmotovým odezвовým systémem je tvořen jednokolovým paralelogramovým závěsem s měřicím kolem rovnoběžným se směrem pojezdu, upevněným do nosného vozidla. Konstrukční požadavky na nosné vozidlo shrnuje norma ČSN 73 6175.



Obr. 2 Dvouhmotový referenční odezвовý systém

kde:

- 1 Odpružená hmota  $M_s$
- 2 Součinitel lineárního tlumení podvozku  $C_s$
- 3 Součinitel tuhosti podvozku  $K_s$
- 4 Neodpružená hmota  $m_u$
- 5 Součinitel tuhosti pneumatiky  $k_t$
- $Z_s$  Vzdálenost odpružené hmoty od povrchu vozovky
- $Z_u$  Vzdálenost neodpružené hmoty od povrchu vozovky

### 3. HODNOCENÍ NEROVNOSTÍ POVRCHU VOZOVEK

Hodnocení podélné nerovnosti povrchu vozovky je prováděno v pětiúrovňové klasifikační stupnici 1 až 5, tab. 1 a 2.

Parametr	Klasifikační stupeň				
	1	2	3	4	5
C [ $10^{-6}$ rad.m]	$C \leq 0,9$	1,0 až 2,2	2,3 až 4,6	4,7 až 10,0	$C > 10,0$
IRI [km/m]	$IRI \leq 1,9$	2,0 až 3,0	3,1 až 4,2	4,3 až 6,3	$IRI > 6,3$

Tab. 1 Klasifikační stupně hodnocení podélné nerovnosti povrchu vozovky

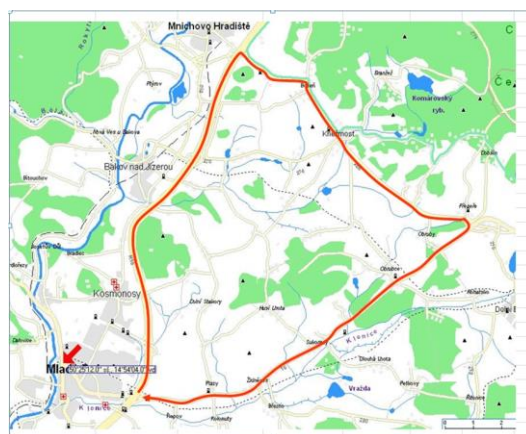
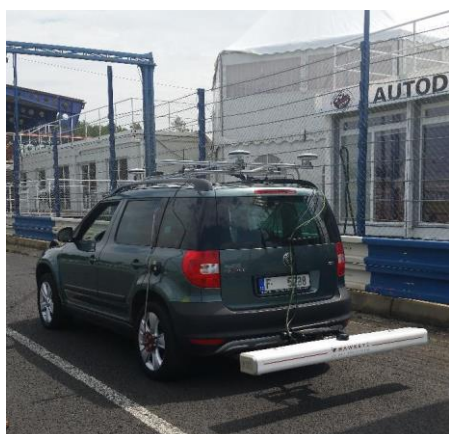
<i>Klasifikační stupeň</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<b>PK s dovolenou rychlostí vyšší než 50 km.h<sup>-1</sup></b>					
<b>PK s dovolenou rychlostí 50 km.h<sup>-1</sup> a nižší</b>					
	<b>Přejímka povrchu pro uvedení do provozu<sup>1)</sup></b>				
	<b>Posouzení povrchu vozovky na konci záruční doby<sup>2)</sup></b>				
	<b>Plán souboru opatření pro zvýšení provozní způsobilosti povrchu vozovky</b>				
	<b>Provedení opatření pro zvýšení provozní způsobilosti povrchu vozovky<sup>3)</sup></b>				
<sup>1)</sup> Pro přejímku povrchu vozovky se připouští výjimka podle tabulky A.6.3. ČSN 73 6175 <sup>2)</sup> Délka záruční doby podle zvláštního předpisu (kapitoly 1 TKP, přílohy 7 tabulky 1) nebo smluvních podmínek. <sup>3)</sup> Do doby provedení opatření se na úseku osadí dopravní značky A 7 „Nerovnost vozovky“, případně sníží dovolená rychlost jízdy dopravní značkou B 20a.					
PK – pozemní komunikace					

Tab. 2 Požadovaná klasifikace podélné nerovnosti povrchu vozovky

#### 4. MĚŘENÍ A ANALÝZA DAT

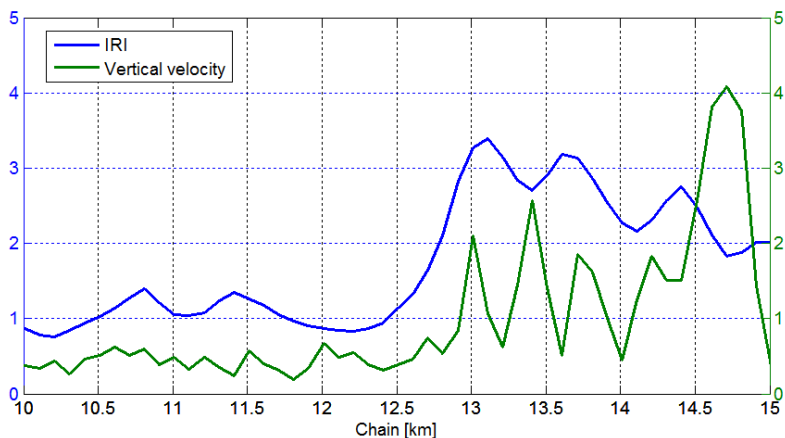
Vlastní měření parametrů vozovky a jejich srovnání s dynamickými jízdními veličinami bylo provedeno na základě dvou odlišných testů. První probíhal za běžného provozu na vybraných pozemních komunikacích v blízkosti Mladé Boleslavi (měření proběhlo v listopadu 2014), druhé měření bylo realizováno na uzavřeném okruhu Sosnová nedaleko České Lípy (červenec 2015).

Pro každé dílčí měření proběhlo 5 – 10 opakování za dodržení konstantních podmínek (rychlost, zatížení), jednotlivé jízdy se lišily pouze ve volbě jízdní stopy. Jízdy probíhaly při rychlostech 40, 60 a 80 km/h s následným zvlhčením povrchu pozemní komunikace. K měření bylo využito zařízení HawkEye, testovací vozidlo Škoda Yeti, měřicí vozidlo TRT, zařízení GripTester a zařízení pro přesné měření polohy s využitím RTK korekcí. Okruh u Mladé Boleslavi sestává z 38 kilometrů silnic a zahrnuje dálnici i silnice I. a II. třídy, viz obrázek 3.



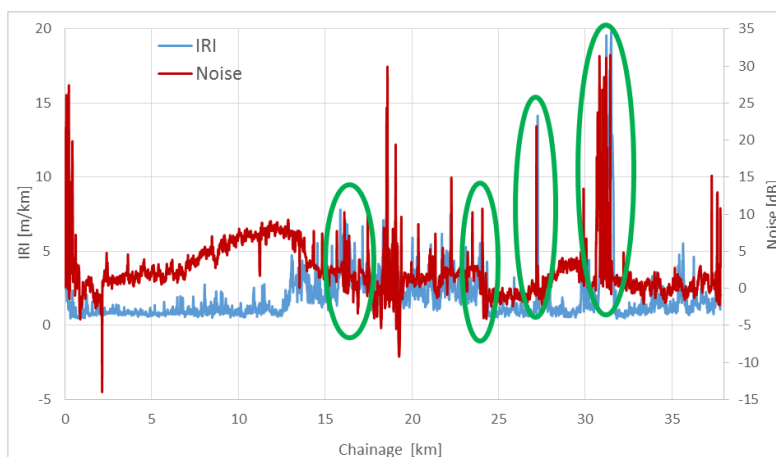
Obr. 3 – Testovací vozidlo Škoda Yeti (vlevo), testovací okruh u Mladé Boleslavi (vpravo)

Po verifikaci kilometrovníku došlo k posouzení korelace parametrů vozovky s jízdními veličinami. Základní analýza ukázala například závislost IRI a rychlosti vozidla ve vertikálním směru, vyhodnocované jako rozdíl nadmořské výšky z GPS, viz obrázek 4.



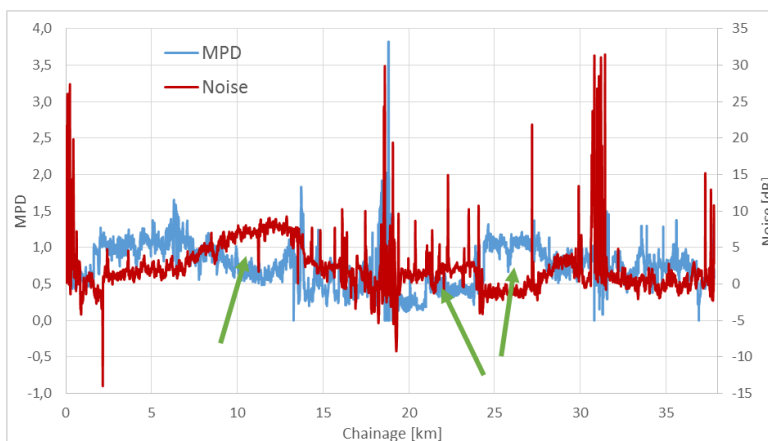
Obr. 4 Průběh IRI a rychlosti vozidla v ose "z"

Mimo měření součinitele podélného tření, makrotextury a nerovností povrchu vozovky proběhlo i měření hladiny hluku  $L_{Eq}$  vznikajícího na kontaktu pneumatika-povrch vozovky, který se ukázal jako vhodný parametr pro identifikaci jiných kvalitativních parametrů povrchu pozemní komunikace, viz obrázek 5.



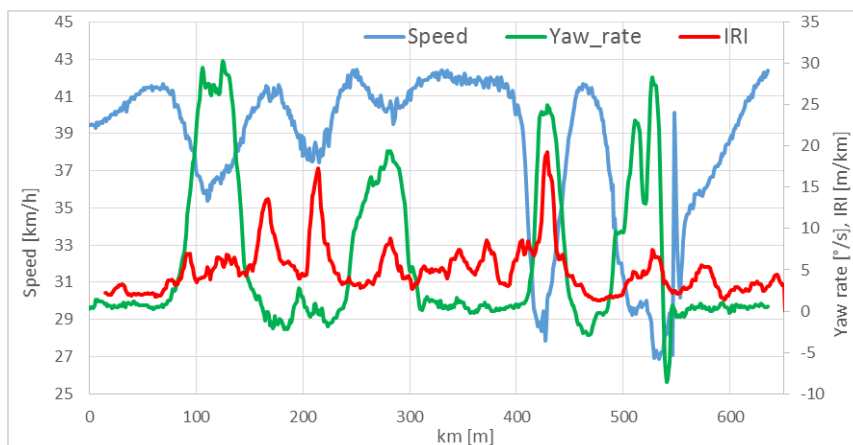
Obr. 5 Průběh IRI a hladiny hlučnosti  $L_{Eq}$ ; v oblastech s většími nerovnostmi je i vyšší hladina hluku

Z měřených parametrů vozovky hladina hluku velmi dobře odpovídala velikosti MPD, jejich vztah lze modelovat inverzní funkcí. Obě veličiny jsou ovšem zatížené šumem a pro účely analýzy byla potřebná jejich filtrace.



Obr. 6 Průběh MPD a hladiny hluchnosti  $L_{Eq}$ ; zeleně zvýrazněné oblasti ilustrují inverzní průběh

Při dynamických testech na uzavřeném okruhu v Sosnové byla potvrzena závislost mezi stáčivou a podélnou rychlostí vozidla. Rovněž bylo zjištěno, že dynamické parametry, zejména při průjezdu směrovým obloukem, citlivě reagují na nerovnosti, což ilustruje následující obrázek 7.

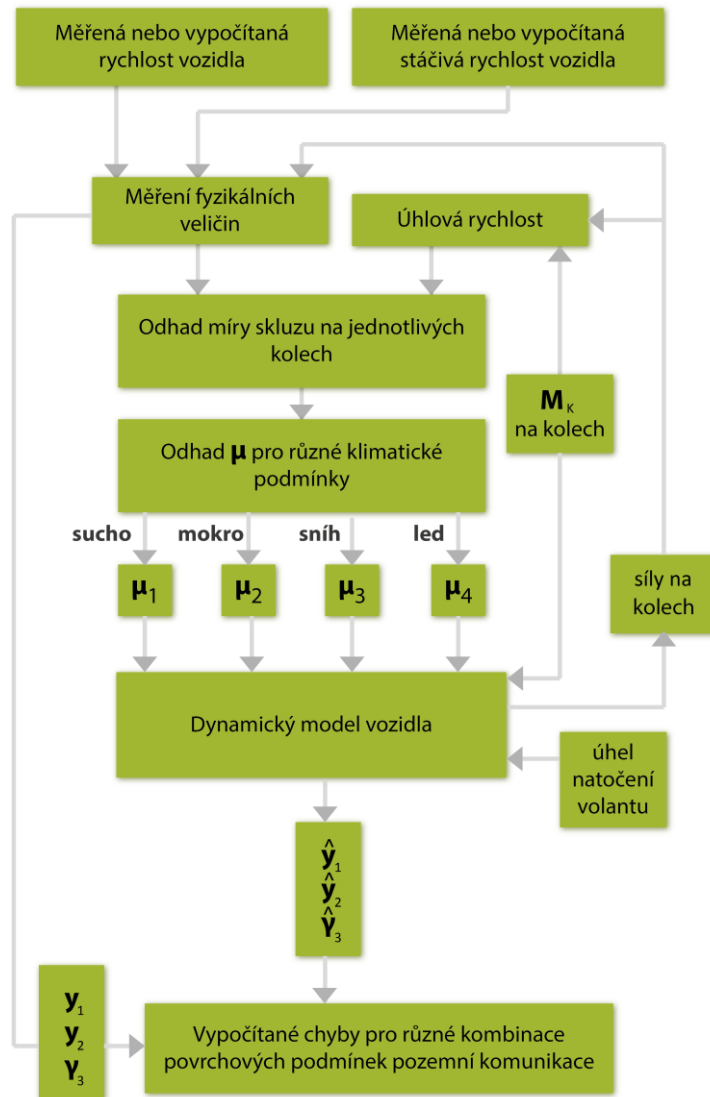


Obr. 7 Průběh IRI ve srovnání s průběhem podélné a stáčivé rychlosti vozidla

## 5. ODHAD SOUČINITELE TŘENÍ S VYUŽITÍM MODELU VOZIDLA

Při návrhu modelu jsme vycházeli z článku [Lin, 2008] popisujícího model pozorovaných veličin. Výchozím předpokladem je schopnost monitorovat podélnou a příčnou rychlost vozidla ( $v_x$ ,  $v_y$ ), stáčivou rychlost ( $w$ ), úhel natočení volantu ( $d$ ) a rychlost otáčení jednotlivých kol ( $v_{ij}$ ).

Postupem dle obr. 8 je možné z výše uvedených hodnot získat úhel skluzu ( $a_{ij}$ ). Z rozdílu rychlosti vozidla a obvodové rychlosti kola je následně možné odvodit míru skluzu ( $s_{ij}$ ). V závislosti na váhových koeficientech ( $m_{ij}$ ) a tuhosti pneumatik v podélném a příčném směru ( $C_P$ ,  $C_L$ ) na jednotlivých kolech je možné odvodit podélné a příčné síly na jednotlivých kolech ( $F_{Sij}$ ,  $F_{Lij}$ ), přičemž  $F_{nij}$  reprezentuje normálovou sílu na jednotlivých kolech, kde v modelu je zaveden předpoklad rovnoměrného rozložení zatížení sil na jednotlivých kolech,  $F_{nij} = F_n = mg/4$



Obr. 8 Klasifikační model pro predikci součinitele tření

Odezvu vozidla je možné popsat následující soustavou rovnic:

$$\begin{aligned}
 m\dot{v}_x &= mwv_y + F_{LLP} \cos(d) + F_{LPP} \cos(d) - F_{SLP} \sin(d) - F_{SPP} \sin(d) + F_{LLZ} + F_{LPZ} \\
 m\dot{v}_y &= -mwv_x + F_{LLP} \sin(d) + F_{LPP} \sin(d) + F_{SLP} \cos(d) + F_{SPP} \cos(d) + F_{SLZ} + F_{SPZ} \\
 J\dot{\omega} &= (F_{LPP} \cos(d) - F_{LLP} \cos(d) + F_{SLP} \sin(d) - F_{SPP} \sin(d) - F_{LLZ} + F_{LPZ})l_t \\
 &\quad + (F_{LPP} \sin(d) + F_{LLP} \sin(d) + F_{SLP} \cos(d) + F_{SPP} \cos(d))l_f - (F_{SLZ} + F_{SPZ})l_r
 \end{aligned} \tag{1}$$

Jelikož je změna pohybu vozidla s ohledem na integrované jízdní senzory známá, je možné tímto způsobem stanovit hodnoty neznámých koeficientů  $l_t$ ,  $l_f$  a  $l_r$ . Za předpokladu shodného součinitele tření na jednotlivých kolech systém reprezentuje soustavu 3 rovnic pro jednu neznámou, což umožňuje statistické vyhodnocení. Vlastní vyhodnocení míry a úhlu skluzu pak dává možnost nalezení korelací s hodnotami parametrů povrchu vozovky.

## 6. ZÁVĚR

V příspěvku je nastíněn nový přístup hodnocení nerovností a protismykových vlastností povrchů vozovek ze snímaných parametrů z čidel běžně osazených do vozidel. Pokračování výzkumu může založit nové pohledy jak na hodnocení stanovených parametrů

rovnosti a protismykových vlastností měřicími vozidly, tak přispěje k vývoji adaptivního interaktivního systému pro zvýšení bezpečnosti osádky vozidel.

## PODĚKOVÁNÍ

Řešitelé projektu by rádi poděkovali Technologické agentuře ČR za finanční podporu projektu v rámci 4. veřejné soutěže ve výzkumu a experimentálním vývoji „ALFA“.

## LITERATURA

- [1] ČSN 73 6175 – Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek, duben 2015. ČSN 73 6177 – Měření a hodnocení protismykových vlastností povrchů vozovek, prosinec 2015.
- [2] ČSN EN ISO 13473-1. Popis textury vozovky pomocí profilů povrchu – Část 1: Určování průměrné hloubky profilu, listopad 2004.
- [3] ČSN ISO 13473-2. Popis textury vozovky pomocí profilů povrchu - Část 2: Terminologie a základní požadavky vztahující se k analýze profilu textury vozovky, prosinec 2003.
- [4] ČSN ISO 13473-3. Popis textury vozovky pomocí profilů povrchu – Část 3: Specifikace a klasifikace profilometrů, září 2004.
- [5] CEN/TS 13036-2. Road and airfield surface characteristics – Test methods – Part 2: Assessment of the skid resistance of a road pavement surface by the use of dynamic measuring systems, March 2010.
- [6] ČSN P CEN/TS 15901-4. Povrchové vlastnosti vozovek pozemních komunikací a letištních ploch – Část 4: Postup pro stanovení protismykových vlastností povrchu vozovek pomocí zařízení s řízeným podélným skluzem (LFCT): Tatra Runway Tester (TRT), listopad 2010. Je možné, že hodnoty součinitele tření jsou v obr. 6 zařízení GripTester, který má svou samostatnou část
- [7] Lin, Observer-Based Road Surface Condition Detection and Identification 2008
- [8] Projekt SURF „ALFA“ TA ČR