



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

EXPERIMENTÁLNÍ IDENTIFIKACE PROFILU VOZOVKY

EXPERIMENTAL IDENTIFICATION OF ROAD PROFILE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Baroš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hejtmánek, Ph.D.

BRNO 2016

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Baroš

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Experimentální identifikace profilu vozovky

v anglickém jazyce:

Experimental Identification of Road Profile

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh metody a měřicího zařízení pro experimentální identifikaci profilu vozovky, konkrétně nerovností, které způsobují svislé kmitání kol automobilu. Součástí stanoveného úkolu je i matematické zpracování naměřeného signálu.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše metod měření nerovností vozovky
2. Konstrukční návrh vlastního zařízení
3. Návrh měřicího řetězce
4. Sestavení návodu pro matematické zpracování naměřeného signálu

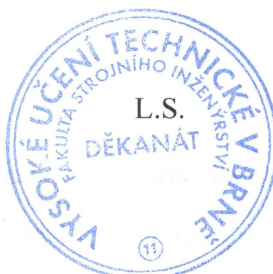
Seznam odborné literatury:

- [1] VLK,F. Dynamika motorových vozidel. ISBN 80-238-5273-6, Nakladatelství VLK, Brno 2000
- [2] GILLESPIE, T. Fundamentals of vehicle dynamics. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992, 495 p. ISBN 15-609-1199-9.
- [3] DIXON,J.C. Tires, suspension and handling. ISBN 1-56091-831-4, SAE International, Warrendale 1996.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Hejtmánek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 26. 11. 2014



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan



ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá především návrhem metodiky hodnocení nerovností vozovky, které ovlivňují jízdní vlastnosti automobilu a jízdní komfort. V úvodní teoretické části jsou probrány nejpoužívanější postupy a metody používané pro analýzu drsnosti vozovky ve světě. V rámci této diplomové práce bylo provedeno experimentální měření, při kterém byla získána data použitá při návrhu vlastní metodiky a zařízení pro analýzu profilu vozovky.

KLÍČOVÁ SLOVA

profil vozovky, drsnost vozovky, jízdní komfort, IRI, čtvrtinový model vozu, inerciální profilometr

ABSTRACT

The diploma thesis focuses especially on a design of a way for evaluating roughness in road profile, which affects driving characteristics of a car and a ride. In the theoretical part of the thesis are mentioned the most used methods and tools for road roughness analysis in the world. For the purposes of this thesis an experimental measuring were undertaken in order to obtain data for the own design of a road profile analysing system.

KEYWORDS

road profile, road roughness, ride, IRI, quarter car model, inertial profiler



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BAROŠ, M. *Experimentální identifikace profilu vozovky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 92 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Hejtmánek, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Hejtmánka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Bc. Martin Baroš



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Petru Hejtmánkovi, Ph.D. za všechny cenné rady, podporu a hlavně čas, který mi při vypracování této diplomové práce poskytl. Ze všeho nejvíce bych ale tímto chtěl poděkovat své rodině, především svým rodičům, bez jejichž podpory by bylo mé studium na této škole mnohem a mnohem obtížnější.



OBSAH

Úvod	11
1 Profil vozovky	12
1.1 Harmonické nerovnosti	13
1.2 Výkonová spektrální hustota	15
1.3 Využití měření drsnosti vozovky v praxi	17
2 Jízdní pohodlí a bezpečnost	18
3 Zařízení pro měření profilu vozovky	21
3.1 Statické metody měření profilu	21
3.2 Inerciální profilometry	22
3.3 Další zařízení	24
3.4 Třídy přesnosti	28
3.5 Použití různých systémů	29
4 Hodnocení drsnosti povrchu vozovky	31
4.1 Indexy drsnosti vozovky	31
4.1.1 International Roughness Index	32
4.1.2 Ride Number	33
4.1.3 Další indexy profilu	34
5 Měřicí řetězec	36
5.1 Měřené veličiny	36
5.1.1 Zajištění referenční hladiny	36
5.1.2 Měření vzdálenosti povrchu vozovky vůči referenční hladině	38
5.1.3 Měření ujeté vzdálenosti	40
5.2 Měření relativní vzdálenosti mezi karoserií a nápravou	41
5.3 Výpočetní technika	42
5.4 Blokované schéma měřícího řetězce	43
6 Experiment	44
6.1 Příprava experimentu	44
6.2 Realizace	46
7 Matematické zpracování naměřených dat	47
7.1 Vytvoření profilu vozovky	47
7.2 Filtrace	49
7.3 Výkonová spektrální hustota	52
7.4 Výpočet IRI	53
7.4.1 Čtvrtinový model automobilu	53
7.4.2 Výpočet	56



7.5	Výpočet RN	59
8	Výsledky měření	60
8.1	Přesnost měření	61
8.2	Vliv rychlosti	74
8.3	Význam kompenzace měřením zrychlení odpružených hmot	76
8.4	Hodnocení drsnosti vozovky podle zrychlení odpružených hmot	80
9	Konstrukční návrh	84
	Závěr	87
	Seznam použitých zkratk a symbolů	90
	Seznam příloh	92



ÚVOD

První silnice se stavěly už v dobách římského impéria. Jednou z nejznámějších z nich je zcela jistě Via Appia. Dlážděná silnice, jejíž stavba započala na sklonku 4. století př. n. l. a táhla se od Říma do města Capua v Kampánii. Požadavky na kvalitu povrchu silnic byly v těchto časech pochopitelně zcela odlišné od požadavků dnešní moderní doby a platilo, že čím je silnice horší, tím více zbrzdí případný vpád protivníka do země.

První dálnice se začaly stavět v Německu před první světovou válkou a jako stavební materiál se používal beton. V dnešní době se stále více využívá asfalt, jehož povrch je při jízdě pohodlnější, ale nemá tak vysokou trvanlivost jako povrch z betonu.

Kvalita povrchu silnice nabývá v dnešní době stále se zvyšujících požadavků na rychlost a pohodlí přepravy stále výraznějšího významu. Určitě každý člověk se při jízdě v automobilu setkal s nepříjemnými vibracemi způsobenými jízdou po nerovné, staré nebo rozbité vozovce. Tyto otřesy mohou mít při určitých frekvencích a dostatečně dlouhé době působení nežádoucí následky na zdraví lidského organismu. Špatný stav vozovky zpomaluje rychlost průjezdu daného úseku. Vznikající dynamické síly mezi pneumatikou a vozovkou snižují bezpečnost provozu. Vibrace způsobené nerovnostmi na vozovce přispívají k opotřebení pneumatik a součástí náprav vozidla a zvyšují zatížení povrchu vozovky, jehož stav se tak stále více zhoršuje.

Je zřejmé, že analýza stavu silniční sítě dnes hraje velmi významnou roli v automobilové dopravě. Měřením se zjišťuje technický stav úseku silniční sítě nebo poloha lokálního defektu na povrchu vozovky. Pravidelným průzkumem je možné sledovat zhoršení stavu silnice v průběhu několika let. Získaná data pak lze využít pro plánování oprav a údržby silniční sítě nebo např. pro ověření kvality nově postavené silnice.

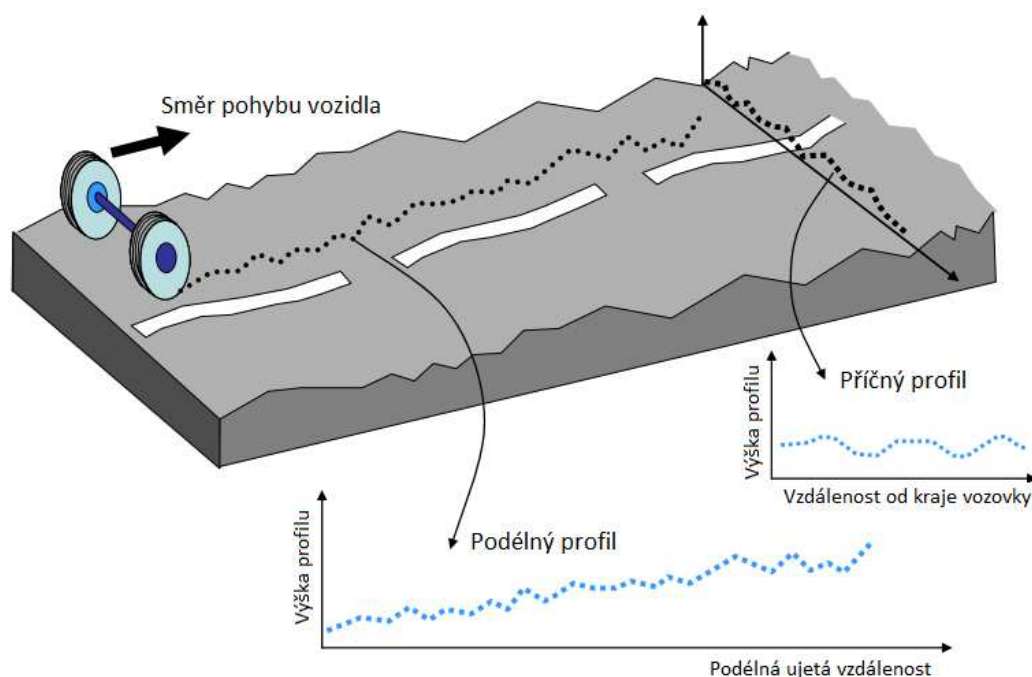
Hlavním úkolem této diplomové práce je navrhnout metodiku analýzy profilu vozovky s důrazem na nerovnosti, které ovlivňují jízdní vlastnosti automobilu a negativně působí na jízdní komfort.



1 PROFIL VOZOVKY

Profil vozovky znázorňuje průběh nerovností povrchu vozovky podél určité myšlené čáry, která se nazývá stopa. Směr stopy je zpravidla shodný se směrem pohybu vozidel, ale může na něj být také kolmý. V prvním případě se jedná o podélný profil, jehož analýzou a vlastnostmi se zabývá tato diplomové práce. Druhý případ představuje příčný profil. Ten obsahuje informace o tvaru vozovky ve směru kolmém vůči směru pohybu vozidel. Ve srovnání s podélným profilem je jeho význam malý a s jeho analýzou se lze setkat spíše výjimečně. Z tohoto důvodu nebude problematika příčného profilu dále probírána.

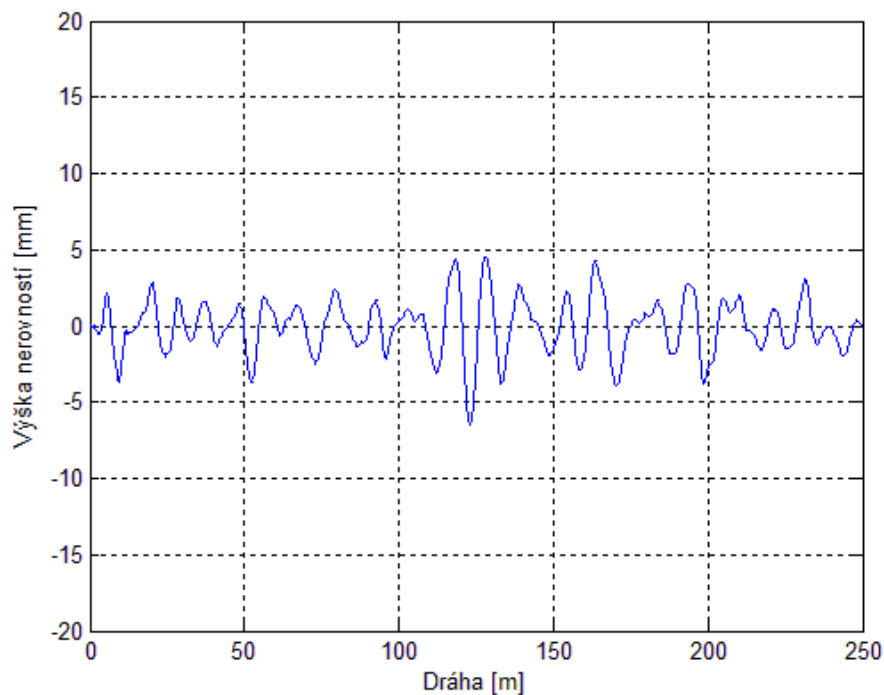
Počet stop, ve kterých je měřen profil vozovky na určitém úseku silnice, je libovolný a závisí především na účelu, za jakým jsou data získávána. Zpravidla se provádí měření ve dvou stopách. Jedna stopa odpovídá jízdě stopě levého kola automobilu a druhá odpovídá stopě pravého kola. Pro detailnější průzkum vozovky je možné měřit profil ve více stopách současně.



Obr. 1 Podélný a příčný profil vozovky (popis přeložen z angl.) [5]

Směr stopy nemusí být zcela rovný. Pro lepší porovnatelnost naměřených hodnot je však vhodné udržovat stálou vzdálenost vzhledem ke středu vozovky, případně k jejímu okraji.

Šířka stopy je určena použitým měřicím systémem. Pro srovnání, např. laserový snímač pokryje oblast o šířce několika milimetrů, zatímco ultrazvukový senzor snímá úsek o velikosti několika centimetrů. Vliv šířky měřené stopy většinou nehraje významnou roli a výběr konkrétních měřicích systémů a jejich senzorů pro daný účel je ovlivněn spíše jinými faktory.

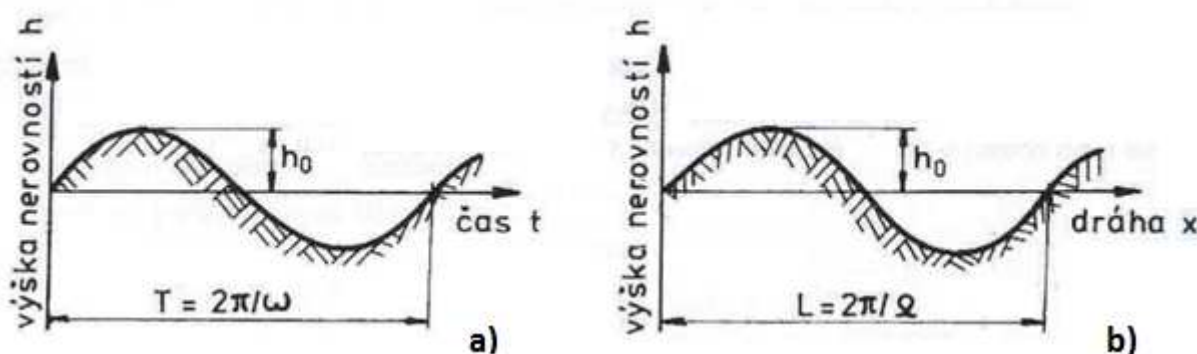


Obr. 2 Ukázka průběhu profilu vozovky (krátký úsek silnice I/43 v Brně)

1.1 HARMONICKÉ NEROVNOSTI

Povrch vozovky ve tvaru harmonické funkce představuje ideální případ a v běžném provozu se nevyskytuje. Profil skutečné vozovky má náhodný průběh, viz např. obrázek č. 2.

Jakoukoli náhodnou křivku je možné nahradit limitním součtem harmonických funkcí o různé úhlové frekvenci, amplitudě a počáteční fázi. Podrobněji je tato problematika popsána v další podkapitole. Problematika harmonických nerovností je ale vhodná pro zavedení základních pojmů a pro vysvětlení působení nerovností na kinematiku vozidla.



Obr. 3 Harmonický průběh nerovností [1]

Na obrázku č. 3 je znázorněn průběh nerovností povrchu vozovky ve tvaru harmonické funkce. Funkce je definována amplitudou h_0 , úhlovou frekvencí ω a nulovou počáteční fází. Výška nerovností v čase t je pak definována podle vztahu [1]:



$$h(t) = h_0 \sin(\omega t) = h_0 \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (1)$$

kde T je perioda harmonické funkce. Pro vyjádření průběhu nerovností v závislosti na dráze x je potřeba zavést veličinu zvanou dráhová úhlová frekvence Ω [1]:

$$\Omega = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2)$$

kde λ je vlnová délka harmonické funkce. Rovnice (1) pak přejde na tvar [1]:

$$h(x) = h_0 \sin(\Omega x) = h_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x. \quad (3)$$

Porovnáním rovnic (1) a (3) je vytvořen vztah [1]:

$$\omega t = \Omega x. \quad (4)$$

Za podmínky konstantní rychlosti v přechází rovnice (4) na tvar [1]:

$$\omega = \Omega \frac{x}{t} = \Omega v = \frac{2\pi}{\lambda} v. \quad (5)$$

Z rovnice (5) vyplývá, že úhlová budící frekvence je při konstantní vlnové délce nerovností přímo úměrná rychlosti jízdy vozidla.

U dvounápravových vozidel působí nerovnosti v jedné jízdni stopě na přední i zadní kolo. Pokud jsou přední kola buzena průběhem nerovností podle rovnice (1), působení na zadní kolo vyjadřuje rovnice [1]:

$$h(t) = h_0 \sin \omega(t - \Delta t), \quad (6)$$

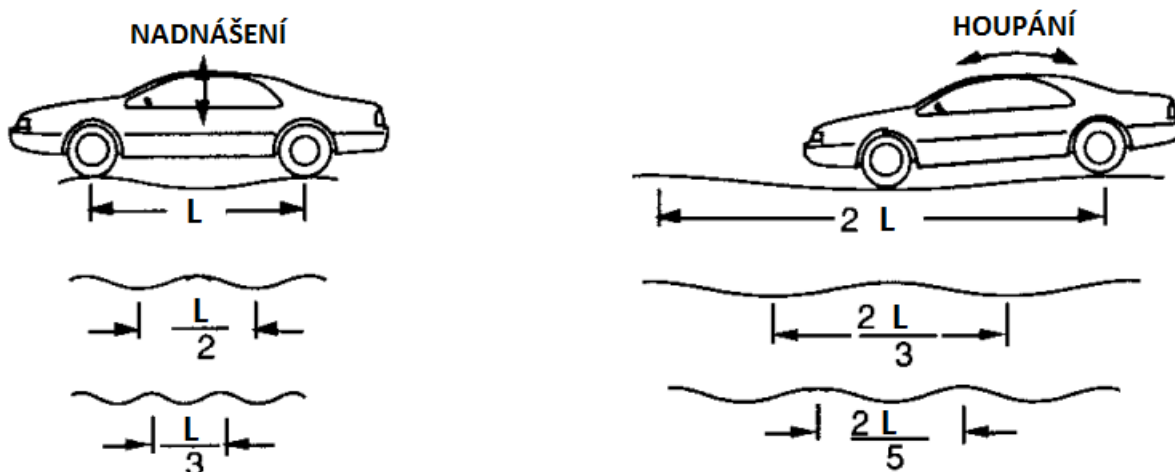
kde Δt je časové zpoždění působení nerovností na zadní nápravu, definované vztahem [1]:

$$\Delta t = \frac{l}{v}, \quad (7)$$

kde l je rozvor vozidla. Pokud bude fázový úhel φ definovaný vztahem

$$\varphi = \omega \Delta t, \quad (8)$$

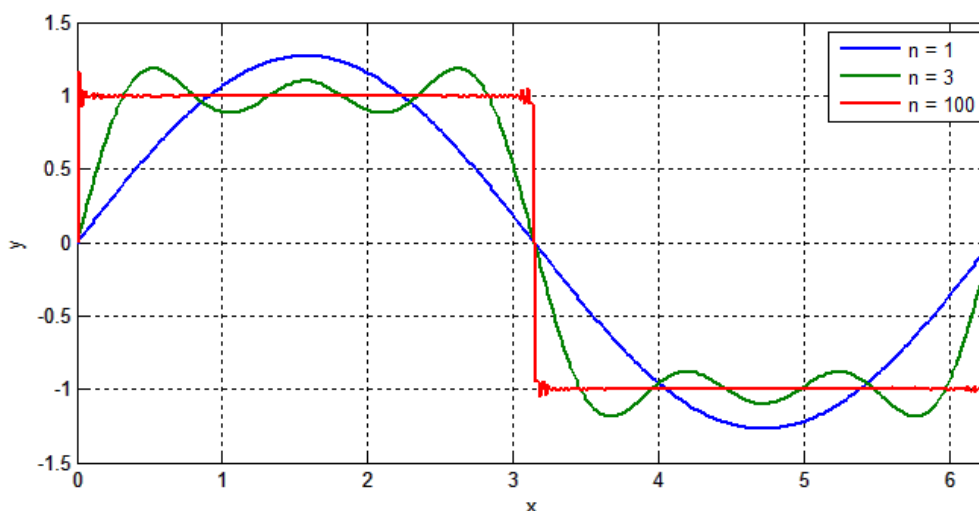
nabývat hodnot pouze sudých násobků čísla π ($0, 2\pi, 4\pi, \dots$), pohyb předního i zadního kola bude stejný a vozidlo bude buzeno pouze ke svislému pohybu, tedy nadnášení. V případě, kdy úhel φ nabývá lichých násobků čísla π ($\pi, 3\pi, 5\pi, \dots$), dochází ke kmitání kolem příčné osy – houpání. Ve všech ostatních případech je výsledný pohyb složený z nadnášení a houpání.



Obr. 4 Pohyby vozidla v důsledku harmonických nerovností (popis přeložen z angl.) [2]

1.2 VÝKONOVÁ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA

V předchozím odstavci bylo zmíněno, že jakoukoliv libovolnou křivku je možné vyjádřit jako limitní součet harmonických funkcí o různé úhlové frekvenci, amplitudě a počáteční fázi. Tuto skutečnost lze demonstrovat na příkladu skokové funkce. Při nahrazení skokové funkce jedinou harmonickou funkcí se stejnou vlnovou délkou vzniká její velmi nepřesná aproximace. Pokud jsou k dané harmonické funkci přidávány další liché harmonické složky s amplitudou nepřímo úměrnou jejich řádu, aproximace se stává přesnější. Amplitudy ostatních harmonických složek mají samozřejmě nulovou hodnotu.



Obr. 5 Aproximace skokové funkce součtem n harmonických funkcí

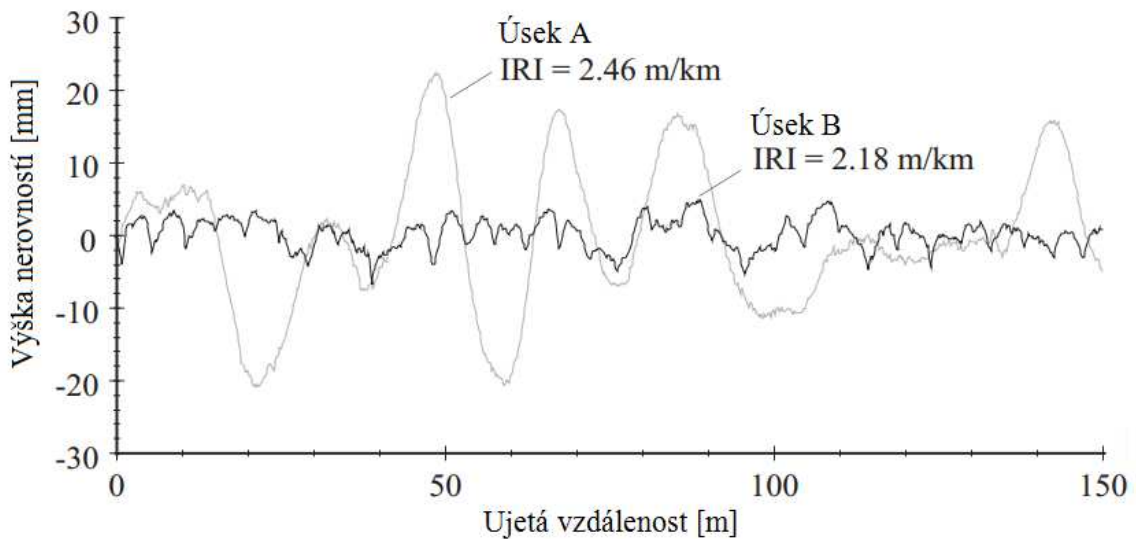
Matematická funkce, pomocí které jsou počítány amplitudy jednotlivých harmonických složek pro aproximaci dané funkce, se nazývá Fourierova transformace. Jedná se o transformaci převádějící signál z časové závislosti do závislosti frekvenční, definovanou pomocí vztahu [6]:



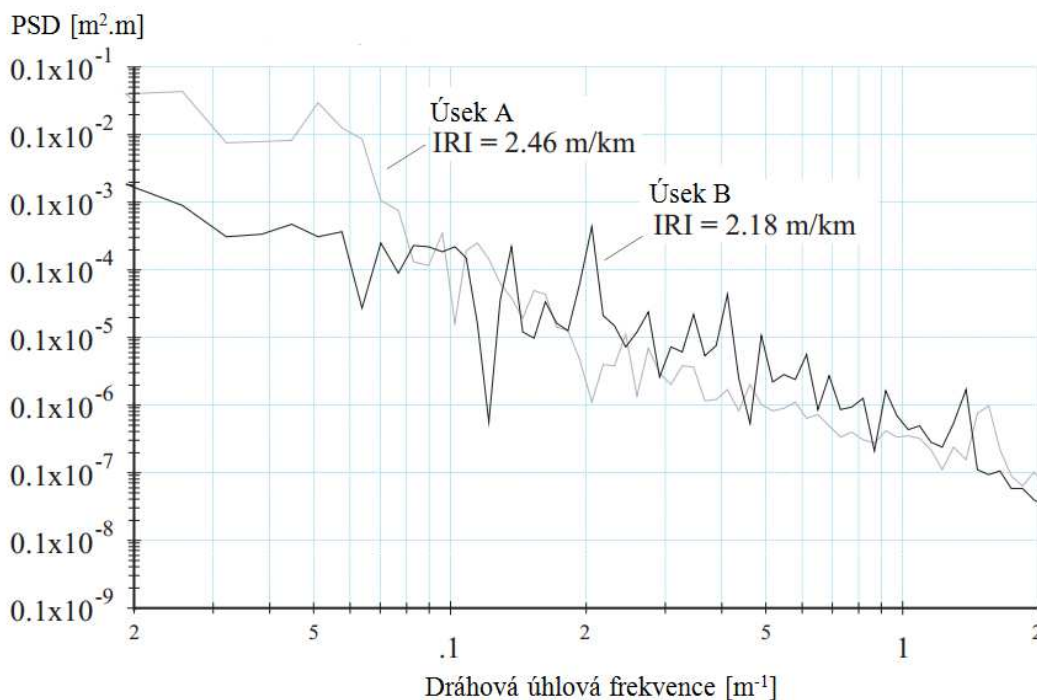
$$F(\omega) = \int_{t \in \mathbb{R}} f(t) \cdot (\cos(\omega t) + i \cdot \sin(\omega t)) dt = \int_{t \in \mathbb{R}} f(t) \cdot e^{-i\omega t} dt, \quad (9)$$

kde $f(t)$ představuje původní funkci f v závislosti na čase a $F(\omega)$ je její vyjádření ve frekvenční doméně. Podrobnější výklad problematiky Fourierovy transformace je k dispozici zde: [6].

Existují různé profily vozovky s podobnými charakteristikami drsnosti, např. IRI (bude vysvětleno později), které se ale na první pohled odlišují svým tvarem, viz obrázek 6. Úsek A je charakteristický nerovnostmi s velkou amplitudou a vlnovou délkou, které jsou typické pro asfaltové cesty. Naproti tomu pro úsek B jsou typické kratší a menší nerovnosti, charakteristické pro betonové silnice. Průběhy výkonové spektrální hustoty pro oba úseky jsou na první pohled podobné. Pro nízké hodnoty dráhové úhlové frekvence jsou amplitudy mnohem vyšší než pro vysoké frekvence a se vzrůstající frekvencí se jejich velikost výrazně zmenšuje. Tento trend platí obecně pro každý profil vozovky. Při bližším zkoumání PSD funkcí úseků A a B vyjdou najevo vzájemné charakteristické rozdíly. Pro nízké hodnoty dráhové úhlové frekvence až do hodnoty kolem $0,1 \text{ m}^{-1}$ jsou amplitudy nerovností úseku A relativně vyšší než u úseku B. Pro nerovnosti o frekvenci kolem $0,3 \text{ m}^{-1}$ a vyšší mají naopak větší amplitudy nerovnosti na úseku B. Výkonová spektrální hustota tak poskytuje názornou představu o zastoupení a významu nerovností povrchu vozovky v celém spektru vlnových délek.



Obr. 6 Příklad dvou různých profilů vozovky (popis přeložen z angl.) [4]



Obr. 7 PSD funkce profilů z obrázku č. 4 (popis přeložen z angl.) [4]

1.3 VYUŽITÍ MĚŘENÍ DRSNOSTI VOZOVKY V PRAXI

Analýza profilu povrchu vozovky nachází uplatnění v různých aplikacích, přičemž každá může klást jiné požadavky na přesnost. Pro hodnocení stavu silniční sítě v délce několika desítek až stovek kilometrů není přesnost jednotlivých změřených bodů natolik kritická a nepřesnosti vznikající náhodně v průběhu měření jsou zprůměrovány a v celkovém statistickém hodnocení jsou zanedbatelné.

Pokud je ale cílem detailnější průzkum úseku vozovky o délce pár kilometrů nebo menší, přesnost může být limitujícím faktorem. Smyslem měření v takovém případě může být lokalizace defektů na povrchu vozovky s přesností několika málo metrů. Takový profil obsahuje informace pro detailní analýzu stavu konkrétního úseku vozovky.

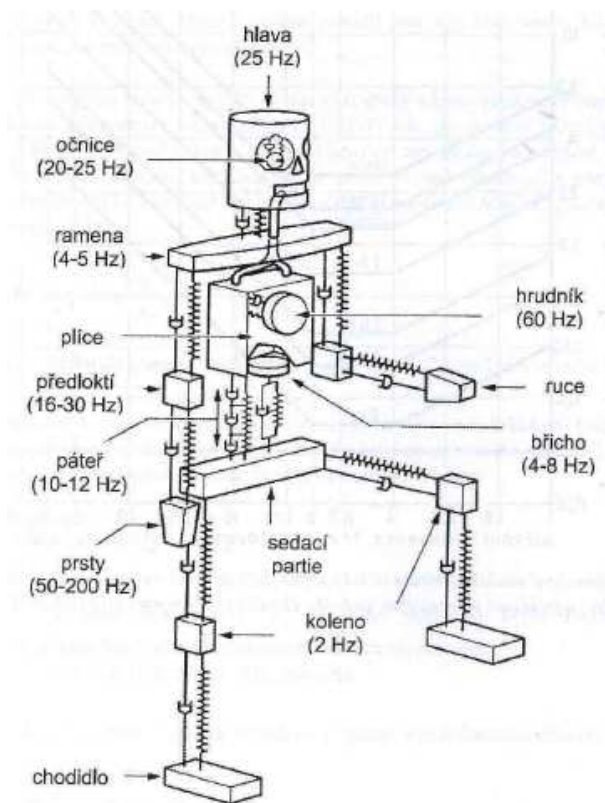
Uplatnění se nachází i při posuzování jízdního komfortu. Naměřený profil může být ve spolupráci s matematickým modelem využit pro simulaci chování vozidla při jízdě po dané vozovce určitou konkrétní rychlostí. Vypočítané hodnoty zrychlení odpružených, případně neodpružených hmot, mohou být využity pro vyhodnocení působení vibrací na cestující ve vozidle nebo mechanické zatížení podvozku vozidla.



2 JÍZDNÍ POHODLÍ A BEZPEČNOST

Cestující jsou při jízdě v dopravních prostředcích vystavováni množství otřesů a vibrací. Příčinou těchto vibrací je především kmitavý pohyb vznikající v důsledku jízdy po nerovném povrchu vozovky, ale také motor automobilu, převodovka a další rotační součásti vozidla. Vznikající vibrace mohou nepříznivě působit na funkci tělesných orgánů. Pokud se frekvence vibrací přibližuje vlastní frekvenci některé části lidského těla, může dojít k její rezonanci a při delším působení i k újmě na zdraví.

Z hlediska jízdního pohodlí je kritické především svislé kmitání. Vlastní frekvence lidského těla ve svislém směru leží v intervalu asi 4 až 6 Hz. Vlastní frekvence jednotlivých částí lidského těla pro svislý směr jsou znázorněny na obr. 8. Vibrace ve směru jízdy snáší lidské tělo hůře než ve směru svislém a vlastní frekvence těla pro tento směr se nachází v intervalu 1 až 3 Hz.



Obr. 8 Vlastní frekvence lidského těla [1]

Působení vibrací na lidské tělo se hodnotí podle velikosti intenzity, frekvence, směru a doby expozice. Intenzita kmitání se vyjadřuje jako hodnota efektivního zrychlení a_{ef} a je definována vztahem [1]:

$$a_{ef} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}. \quad (10)$$



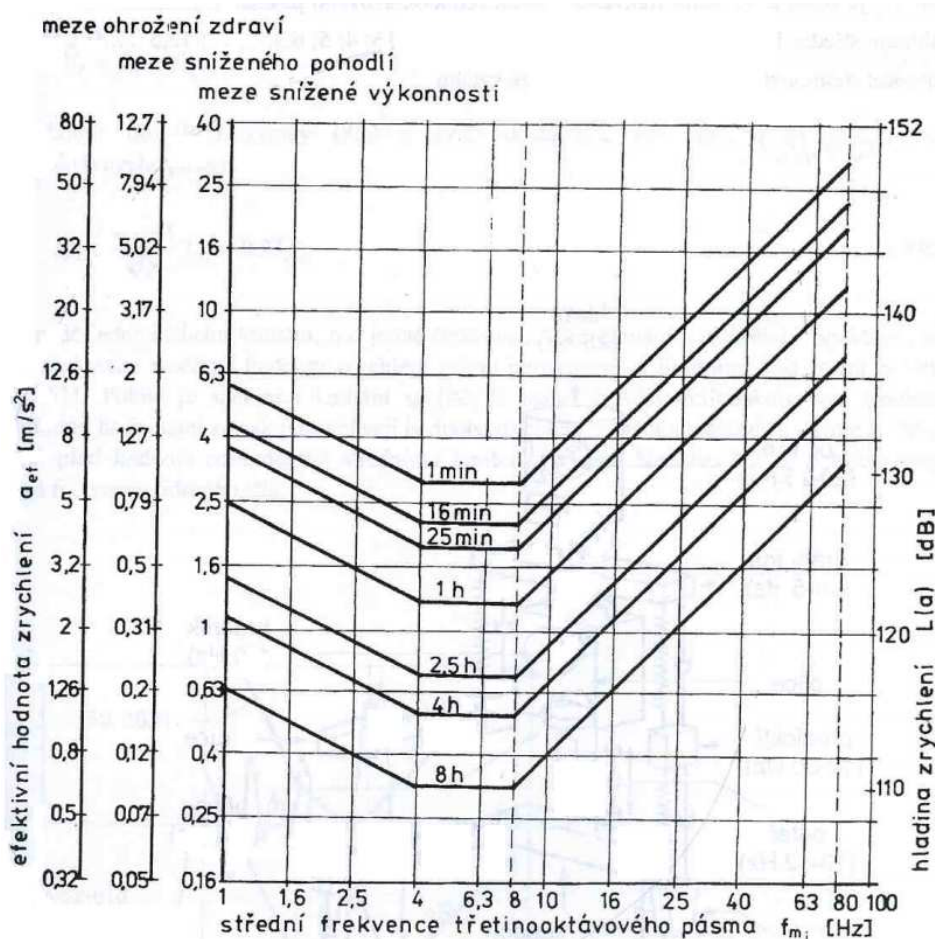
Hodnocení působení vibrací na lidský organismus se provádí podle normy ISO 2631. V normě jsou definovány mezní hodnoty intenzity kmitání v závislosti na frekvenci a době jeho působení. Mezní hodnoty jsou definovány jak pro svislý, tak i vodorovný směr.

Hodnota efektivního zrychlení může být vyjádřena ve formě hladiny zrychlení vibrací $L(a)$, která se určuje podle vztahu [1]:

$$L(a) = 20 \cdot \log \frac{a_{ef}}{a_0}, \quad (11)$$

kde $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$ představuje referenční hodnotu zrychlení.

Na obrázku č. 9 jsou znázorněny meze působení svislého kmitání v závislosti na střední frekvenci třetino-oktávového pásma f_{mi} . Při vyhodnocování účinků vibrací jedoucího vozidla je provedena třetino-oktávová analýza a hodnoty zrychlení v jednotlivých pásmech jsou porovnány s limitními hodnotami v normě.



Obr. 9 Mezi působení svislého kmitání podle normy ISO 2631 [1]

Při jízdě po silnici dochází v důsledku nerovností na povrchu vozovky také ke kmitání kol a tím dochází ke změně velikosti svislého zatížení mezi pneumatikou a vozovkou. Síla zatížení kola se pohybuje okolo střední hodnoty odpovídající jeho statickému zatížení a je definována jako součet statického zatížení kola a dynamické síly mezi kolem a povrchem vozovky.



Z hlediska bezpečnosti jízdy je kritické především snížení velikosti zatížení kola vůči jeho statickému zatížení. Snížením síly zatížení mezi pneumatikou a vozovkou se zmenšují maximální přenositelné obvodové a boční síly, nutné pro brzdění a řízení automobilu.

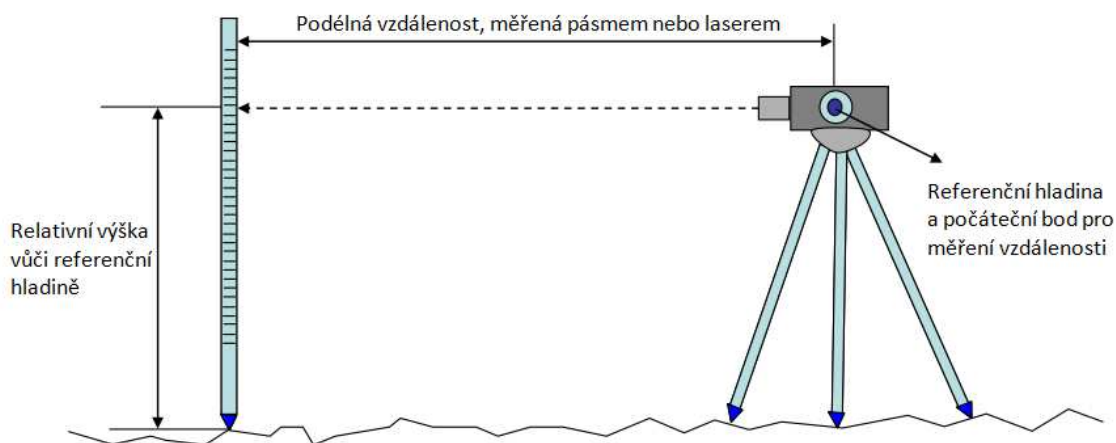


3 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ PROFILU VOZOVKY

Měřením profilu vozovky je získána sekvence čísel, data, která mají specifický vztah vůči skutečnému profilu povrchu vozovky. Data nemusí nutně odpovídat přesnému průběhu skutečného profilu v dané stopě. Skutečný profil obsahuje velké množství informací, které zahrnují stoupání, drsnost vozovky a strukturu povrchu. Většina těchto dat je z hlediska řešeného problému, ať je jakýkoliv, nepodstatná a jejich měření a analýza by byla zbytečně náročná jak z časového hlediska, tak z požadavků na měřicí vybavení. Místo toho jsou při měření zaznamenány jen ty vlastnosti skutečného profilu, které jsou podstatné při analýze zkoumaného problému.

Aby zařízení mohlo být použito pro měření profilu vozovky, je zapotřebí, aby se statistické charakteristiky vozovky vypočítané z dat získaných tímto přístrojem příliš nelišily od hodnot, které by byly získány analýzou skutečného profilu. Toto se ověřuje na předem určených úsecích silnice, kde je profil vozovky změřen s co největší dostupnou přesností.

Každý profilometr musí při práci zajistit tři věci. Definování referenční vztažné hladiny, měření výšky vůči této hladině a záznam podélné vzdálenosti. Vlastní způsoby řešení každé ze tří složek měření a jejich vzájemný vztah se u jednotlivých systémů může výrazně lišit.



Obr. 10 Měření profilu vozovky pomocí nivelačního přístroje (popis přeložen z angl.) [5]

3.1 STATICKÉ METODY MĚŘENÍ PROFILU

NIVELAČNÍ SADA PRO MĚŘENÍ PROFILU

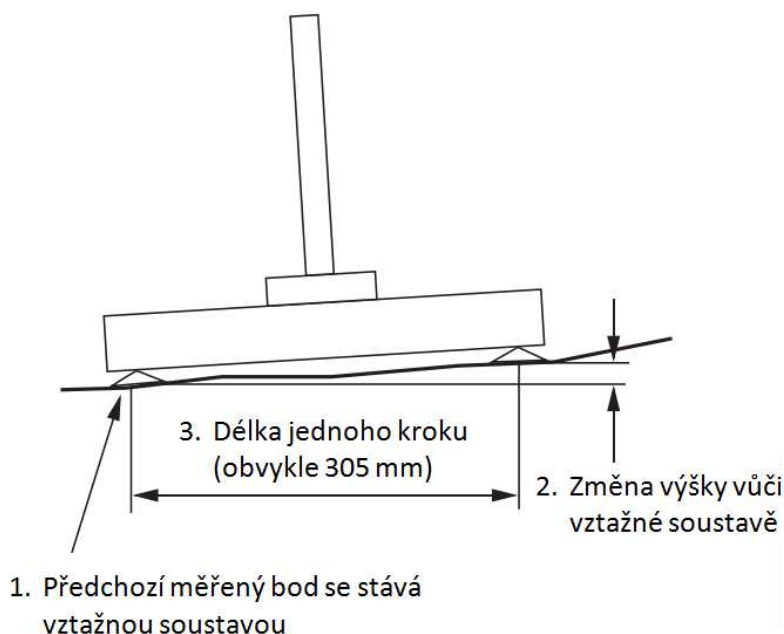
Mezi nejznámější a nejintuitivnější systémy pro analýzu profilu vozovky patří nivelační sada, skládající se z nivelačního přístroje a latě. Optický nivelační přístroj určuje referenční hladinu a za pomoci nivelační latě jsou určovány relativní výšky měřených bodů. Při hodnocení drsnosti vozovky se tento systém příliš často neuplatňuje a je známý především pro své uplatnění ve stavebnictví. Pro analýzu drsnosti vozovky je to časově náročný způsob, který vyžaduje soustavnou spolupráci dvou lidí. Pokud měření provádí zkušený tým, jsou schopni za jeden den naměřit úsek o délce až 600 metrů. Jedná se o velmi přesnou metodu měření,



kteřá může být použita pro analýzu úseku silnice pro kalibraci nebo ověření funkčnosti jiných měřících systémů.

DIPSTICK

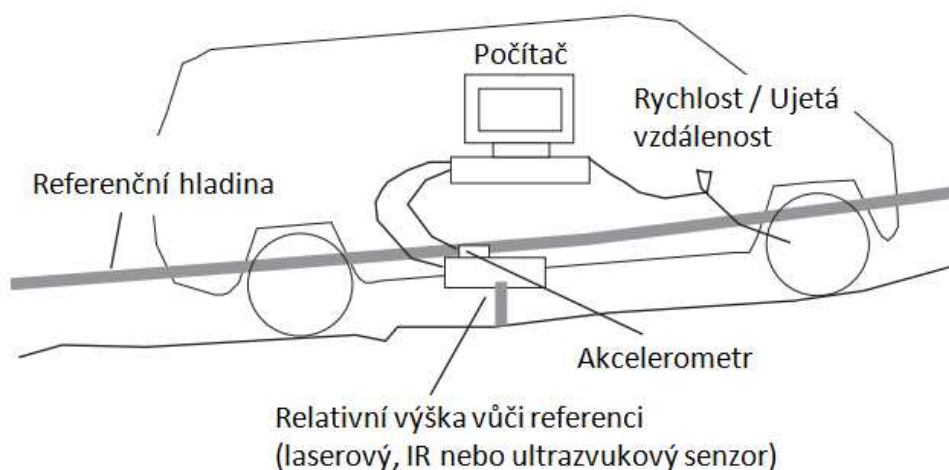
Další používaný přístroj pro analýzu profilu se nazývá Dipstick. Přístroj byl vyvinut ve společnosti Face Company a jeho použití je oproti nivelačnímu přístroji výrazně rychlejší. V zařízení je zabudován vysoce přesný sklonoměr. Z naměřeného úhlu a známé vzdálenosti mezi dvěma nožkami je vypočítán jejich vzájemný výškový rozdíl. Při měření se váha přenáší ze zadní nožky na přední a přístroj se otočí o 180° kolem přední nožky. Jakmile je poloha stabilizována, sklonoměr zaznamená úhel. Ozve se zvukový signál a celý proces se opakuje až dokonce měřeného úseku. Podélná vzdálenost je určena celkovým počtem kroků o známé délce. Naměřené hodnoty jsou automaticky ukládány a zpracovány uvnitř zabudovaným počítačem. Přesnost získaných dat je velmi podobná jako při použití nivelační sady.



Obr. 11 Princip měření profilu se zařízením Dipstick (popis přeložen z angl.) [4]

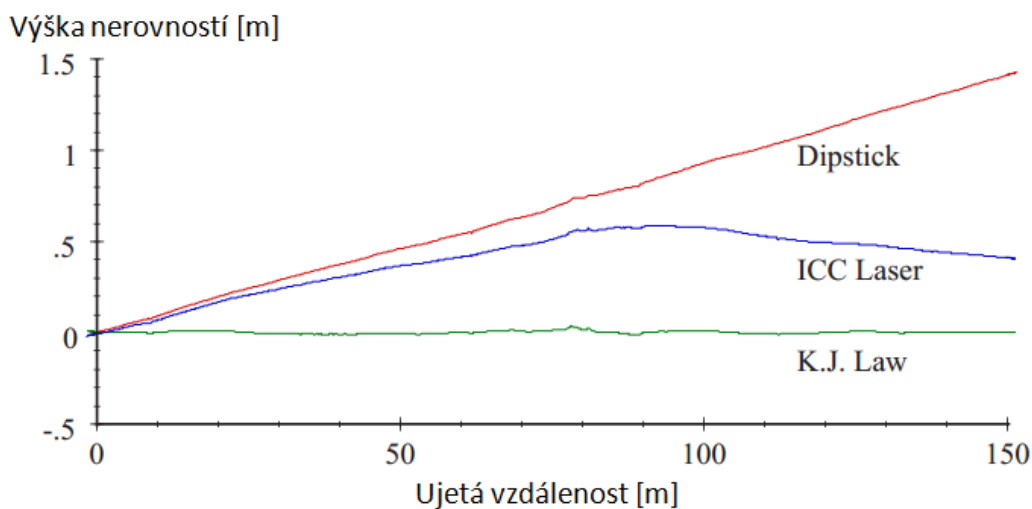
3.2 INERCIÁLNÍ PROFILOMETRY

V šedesátých letech dvacátého století byl ve výzkumných laboratořích společnosti General Motors vyvinut systém umožňující měření profilu vozovky při vysokých rychlostech. K měření je využito vozidlo vybavené bezkontaktním senzorem vzdálenosti. Akcelerometr zaznamenává zrychlení v místě senzoru vzdálenosti a převádí jej na výchylku referenční hladiny vůči inerciální soustavě spojené se zemí. Ujetá vzdálenost je zaznamenávána např. pomocí navigačního systému GPS. Měření je možné provádět při rychlostech přesahujících $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a umožňují tak rychlou a efektivní analýzu stavu silniční sítě o značné rozloze. Aby systém správně pracoval, je ale zapotřebí minimální rychlost alespoň $15 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.



Obr. 12 Funkce inerciálního profilometru (popis přeložen z angl.) [4]

Data získaná pomocí inerciálního profilometru jsou v některých ohledech podobná datům získaným prostřednictvím statického profilometru, ale nejsou zaměnitelná. Na následujícím obrázku je zobrazen průběh záznamů nerovností jednoho úseku vozovky získaného pomocí zařízení Dipstick a dvou inerciálních profilometrů. Profily získané pomocí inerciálních profilometrů byly měřeny při obvyklé cestovní rychlosti, takže jednotlivé měřené stopy se nemusí zcela shodovat. Tato skutečnost však nevysvětluje naprosto odlišný průběh stoupání vozovky na měřeném úseku. Pravdou je, že žádný inerciální profilometr neměří sklon a stovky metrů dlouhé nerovnosti naprosto přesně. Je dokonce možné, že se budou lišit profily pořízené jedním a tím samým zařízením, pouze s odlišným nastavením.



Obr. 13 Porovnání profilů změřených na stejném úseku pomocí tří různých zařízení [4]

Přes tento na první pohled vážný nedostatek obsahují data získaná tímto způsobem informace potřebné pro vyhodnocení drsnosti povrchu vozovky a z tohoto pohledu dosahují inerciální profilometry vysoké přesnosti.



Výhodou používání inerciálních profilometrů oproti statickým měřidlům je kromě vysoké rychlosti a efektivity také vyšší automatizace měřicího procesu. S minimálním ovlivněním přesnosti měření lidským faktorem je možné dosahovat přesnějších a stabilnějších výsledků.

První zařízení tohoto typu nevyžívala bezkontaktních senzorů vzdálenosti. Na místo toho byl zaznamenáván vertikální pohyb menšího kolečka, které kopírovalo povrch silnice. Aby se zabránilo kmitání kolečka, musela být měření prováděna při menších rychlostech. S nástupem moderních bezkontaktních senzorů vzdálenosti se však od tohoto způsobu rychle upustilo.

Dřívější systémy také vyžadovaly, aby byla při měření udržována konstantní rychlost. Dnešní profilometry jsou vybaveny počítačem a jsou schopny provádět korekci menších odchylek v rychlosti.



Obr. 14 Systém s inerciálním profilometrem – průzkumné vozidlo ARAN [5]

3.3 DALŠÍ ZAŘÍZENÍ

ZAŘÍZENÍ NEMĚŘÍCÍ VLASTNÍ PROFIL VOZOVKY

Profilometry měřící průběh nerovností povrchu silnice nebyly pro analýzu drsnosti vozovky využívány odjakživa. Ve dvacátých letech dvacátého století byla na různé automobily instalována zařízení pro měření a záznam relativního pohybu nápravy vůči karosérii či rámu vozidla. Tato zařízení se v anglicky psané literatuře obvykle označují jako „road meters“ nebo „response-type systems“ (RTS). Jako měřící vozidlo mohl být využit osobní automobil, dodávka, lehký nákladní vůz, případně tažený vozík. Jako příklad běžně používaného zařízení tohoto typu lze zmínit např. Mays Ride Meter nebo PCA Meter.

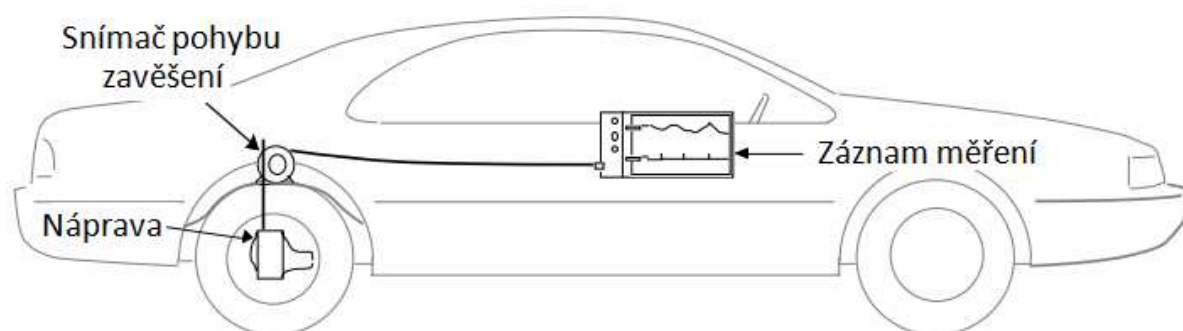
Výchytky zavěšení jsou v průběhu měření zaznamenávány a sčítány a výsledná hodnota je vztažena na celkovou ujetou vzdálenost. Jednotka vypočítaného indexu drsnosti vozovky je v jednotkách $m \cdot km^{-1}$ nebo $in \cdot mi^{-1}$.



Výsledná hodnota drsnosti je ovlivněna všemi prvky, které mají vliv na dynamické vlastnosti vozidla, na kterém je měřicí zařízení instalováno. Žádné dva různé automobily nemají naprosto stejné dynamické vlastnosti, které se navíc mění s časem. Tato skutečnost způsobuje, že měření prováděná dnes, nemohou být přímo porovnávána s měřením uskutečněným před několika lety. Navíc, při použití dvou různých přístrojů nelze očekávat shodné výsledky.

V minulosti byla velkým problémem absence jakéhokoliv standardu pro hodnocení drsnosti vozovky. S definicí tohoto standardu pak bylo možné některé problémy odstranit pomocí kalibrace.

Měřicí systémy pracující na principu záznamu chování vozidla jsou pro analýzu drsnosti vozovky využívány historicky nejdéle. Mezi jejich výhody patří především nízká pořizovací cena a vysoká rychlost měření. Přesnost a spolehlivost dat je v porovnání s profilometry mnohem nižší, nicméně uživatelé těchto zařízení se ve většině případů shodují, že výsledky velmi dobře korespondují se skutečným stavem vozovky.



Obr. 15 Schéma vozidla vybaveného systémem RTS (popis přeložen z angl.) [4]

ARRB WALKING PROFILER

Tento profilometr svými rozměry a tvarem připomíná sekačku na trávu. Jedná se o velice přesné měřicí zařízení pracující při rychlosti odpovídající běžné chůzi, tedy asi do $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Zaznamenává průběh profilu vozovky a poskytuje hodnotu IRI, ve světě nejrozšířenějšího indexu pro posuzování drsnosti vozovky (bude probrán později). Zařízení je ovládáno pomocí tabletu se systémem Android. Naměřená a vypočítaná data se zobrazují na displeji tabletu a prostřednictvím Wi-fi nebo USB kabelu mohou být stažena do počítače pro další analýzu.

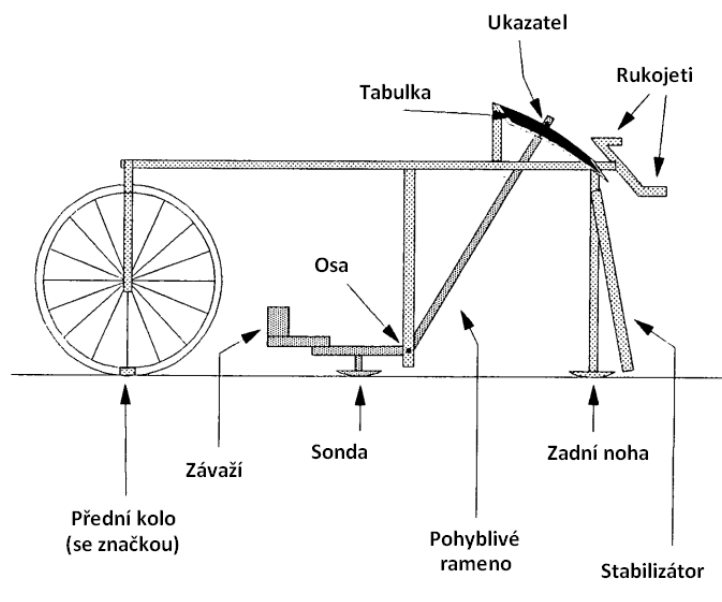
Zařízení je možné využít pro měření úseků pro kalibraci méně přesných měřicích systémů nebo jen k ověření jejich přesnosti.



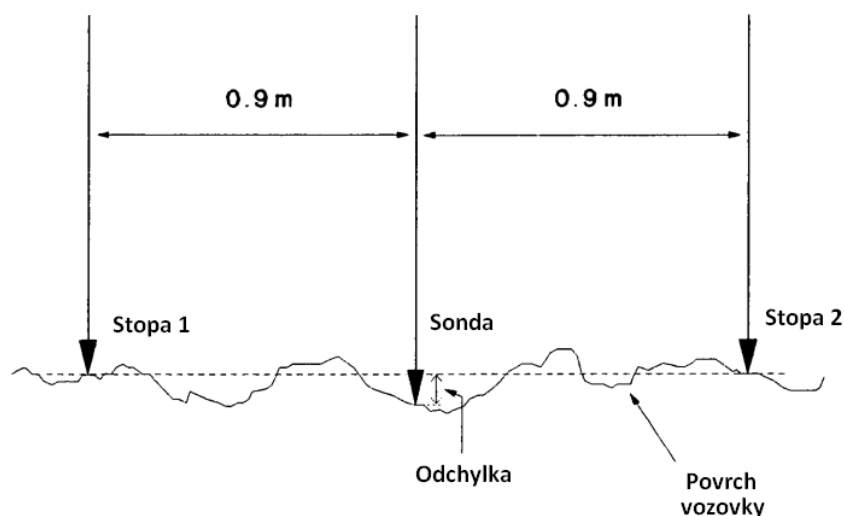
Obr. 16 ARRB Walking Profiler G3 [7]

MERLIN

Ještě jeden typ zařízení pro měření drsnosti vozovky stojí za zmínku. Jedná se o konstrukčně i funkčně jednoduchý přístroj, který byl navržen zejména pro uplatnění v rozvojových zemích. Jméno tohoto zařízení tvoří akronym složený z počátečních písmen anglického názvu: „A Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation“. Zařízení se používá pro měření drsnosti, nebo pro kalibraci jiných měřících systémů s vyšším stupněm automatizace, jako jsou např. zařízení RTS namontovaná ve vozidlech.



Obr. 17 Zařízení Merlin pro měření drsnosti vozovky (popis přeložen z angl.) [14]



Obr. 18 Princip měření drsnosti pomocí zařízení Merlin (popis přeložen z angl.) [14]

Samotné zařízení je tvořeno svařovaným rámem z ocelových trubek s celkovou délkou 1,8 metru. Vepředu je bicyklové kolo a vzadu se nachází opěrná zadní noha. Uprostřed, mezi kolem a zadní nohou se nachází pohyblivá měřicí sonda. Sondy je možné demontovat pro snadnější přepravu zařízení. Za účelem snížení vlivu mikrostruktury povrchu vozovky na naměřené hodnoty jsou sonda i zadní opěrná noha 12 milimetrů široké a jsou zaobleny radiem o velikosti 100 milimetrů. Převodový mechanismus sondy funguje jako mechanický zesilovač s faktorem zesílení 10. Odchylka o velikosti jednoho milimetru se tedy na ukazateli zobrazí jako deset milimetrů.

Měření drsnosti vozovky pomocí zařízení Merlin funguje tak, že sonda uprostřed rámu měří velikost vzdálenosti povrchu vozovky od imaginární přímky, která prochází dotykovými body obou opor, kola a nohy, s povrchem vozovky. Měření se provádějí v pravidelných intervalech podél měřeného úseku silnice a hodnoty udávané převodovým mechanismem sondy jsou zaznamenávány do připravené tabulky v podobě histogramu. Pro snadné určování intervalu jednotlivých měřených bodů je na předním kole značka. Měřítkem drsnosti je rozpětí hodnot ve vytvořené tabulce.

Pro analýzu drsnosti úseku vozovky se doporučuje naměřit alespoň 200 hodnot. Po skončení měření se na tabulce změří délka intervalu, ve kterém se nachází 90 procent všech hodnot. Tzn., že z každého konce tabulky, horního i spodního, se odpočítá 5 procent hodnot. Výsledná délka je vyjádřena v milimetrech a přepočítána korelační rovnicí na parametr drsnosti vozovky. Pro výpočet IRI zde platí vztah [14]:

$$IRI = 0,593 + 0,0471D, \quad (12)$$

kde D [mm] představuje rozpětí hodnot v tabulce. Rovnice (12) platí pro všechny typy povrchů vozovky.

Původní manuální záznam měřených hodnot představuje v dnešní době automatizace velmi nepraktické řešení. Pro zvýšení automatizace měření lze dnes zařízení Merlin vybavit digitálním systémem pro sledování polohy měřicí sondy.



Obr. 19 Ukázka zařízení Merlin vybaveného digitálním systémem pro záznam dat [15]

3.4 TŘÍDY PŘESNOSTI

Z výše uvedeného je zřejmé, že existuje celá řada zařízení pro analýzu drsnosti vozovky a že funkce a složitost těchto zařízení se může výrazně lišit. V roce 1986 byla vytvořena klasifikace pro rozdělení těchto zařízení do čtyř tříd. Hlavním kritériem pro zařazení měřicího systému do příslušné třídy je, zda přístroj zaznamenává průběh nerovností skutečného profilu vozovky, nebo měří reakci vozidla na jízdu po nerovnostech analyzovaného úseku, tj. pohyb zavěšení kola vůči jeho karosérii.

Všechny přístroje měřící vlastní profil vozovky se řadí do první nebo druhé třídy. Pro přesnější rozdělení jsou brány v úvahu další vlastnosti systému, jako jsou interval mezi měřeními body a přesnost získaných dat.

I. Třída

Do první třídy jsou řazeny zařízení, která měří průběh profilu vozovky s nejvyšší dnes dostupnou přesností. Jednotlivé body profilu jsou měřeny s přesností 0,5 milimetrů a vyšší (platí pro hladkou vozovku bez výraznějších nerovností) a jsou od sebe vzdáleny ne více jak 250 milimetrů. Hodnoty IRI získané výpočtem z profilů měřených na jednom úseku by se neměly lišit o více než 0,5 m/km.

Jako příklad zařízení tohoto typu je možné uvést již výše zmíněný Dipstick nebo ARRB Walking Profiler.

II. Třída

Ve druhé třídě se nacházejí profilometry, které nesplňují kritéria první třídy. Jednotlivé body musejí být naměřeny s přesností 1 milimetru a vyšší (opět platí pro hladké vozovky) a jejich vzájemná vzdálenost nesmí překročit délku 500 milimetrů.

Do této třídy se řadí většina vysokorychlostních inerciálních profilometrů.



III. Třída

Třetí třída zahrnuje zařízení, která neměří skutečný profil vozovky, ale reakci vozidla na jízdu po nerovném povrchu vozovky a to jak mechanickým či digitálním způsobem. Kromě systémů RTS se zde také řadí zařízení Merlin.

IV. Třída

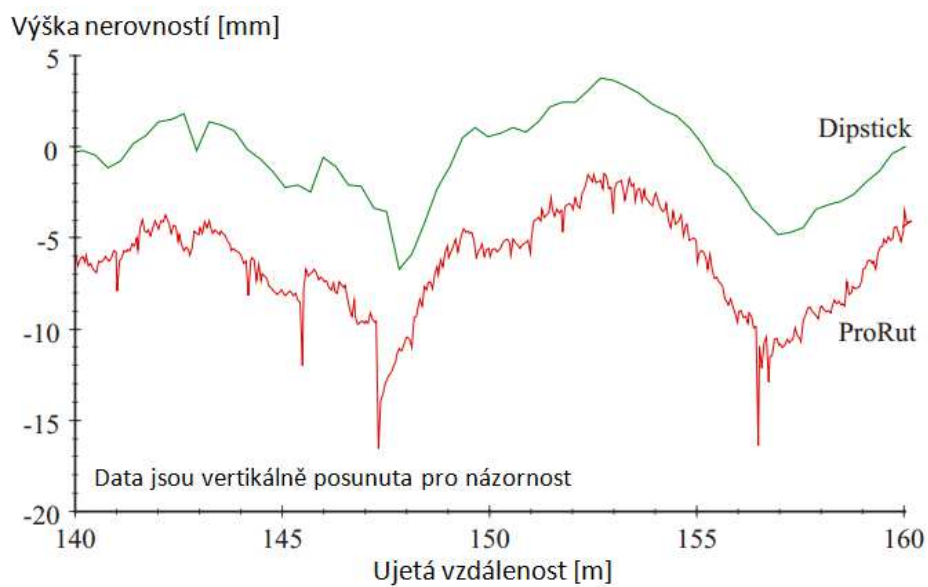
Poslední třída pro hodnocení přesnosti metod analýzy drsnosti vozovky zahrnuje subjektivní hodnocení stavu silnice pověřenou osobou, odborníkem v dané oblasti. Tento odborník posuzuje drsnost vozovky na základě svého subjektivního úsudku, případně může při svém hodnocení využít nekalibrovaný přístroj pro hodnocení drsnosti vozovky.

Metody posuzování drsnosti vozovky spadající do čtvrté třídy přesnosti jsou z dnešního hlediska daleko překonané a jejich použití při analýze povrchu vozovky by bylo zcela nevyhovující, především pak za účelem porovnávání stavu vozovky v delším časovém období.

3.5 POUŽITÍ RŮZNÝCH SYSTÉMŮ

Neexistuje jeden typ profilometru, který by byl vhodný pro všechny aplikace. Použití každého zařízení je omezeno jen na určitou množinu problémů. Např. Dipstick je zařízení, které lze s velkou přesností využít pro určení některých statistických parametrů drsnosti vozovky, jako je např. IRI, a pro určení sklonu vozovky. Přístroj ale nedokáže detekovat trhliny nebo jiné menší charakteristiky povrchu silnice. Na následujícím obrázku je znázorněn průběh dvou profilů změřených na stejném úseku vozovky. Průběh vykreslený zelenou barvou byl změřen pomocí zařízení Dipstick, červený graf byl získán za použití inerciálního profilometru ProRut vyvinutý společností FHWA. ProRut zaznamenává průběh profilu vozovky v bodech vzdálených od sebe o 50 mm. Obě zařízení zaznamenaly základní tvar profilu, ale pouze ProRut zachytil dvě hluboké trhliny ve vzdálenostech 147 metrů a 156,5 metrů od počátku měření.

Jak znázorňuje následující obrázek, rozlišovací úroveň jednotlivých měřících systémů se může značně lišit. Při řešení některých konkrétních problémů může být nižší rozlišovací úroveň dostačující nebo dokonce i žádoucí. Pokud je např. analýza profilu vozovky prováděna z hlediska posuzování jízdního komfortu, tak drobné trhliny a menší defekty, stejně jako mikrostruktura povrchu vozovky, nemají větší význam. Kontaktní plocha mezi pneumatikou a vozovkou má plochu několika centimetrů čtverečních a pneumatika sama se vyznačuje určitou pružností v radiálním směru, takže se při jízdě její tvar přizpůsobuje menším nepravidelnostem ve tvaru povrchu vozovky.



Obr. 20 Profil vozovky změřený pomocí zařízení Dipstick a profilometru ProRut (popis přeložen z angl.) [4]



4 HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU VOZOVKY

Přesná definice drsnosti vozovky, která by umožňovala její kvantifikaci, bohužel neexistuje. Podle definice ASTM (American Society of Testing and Materials) drsnost představuje odchylky povrchu vozovky od plochy kopírující charakteristický tvar vozovky, které ovlivňují dynamické chování vozidla, jízdní komfort a dynamickou sílu mezi kolem a vozovkou. Tato definice ovšem nevypovídá nic o tom, jak by bylo možné drsnost vozovky standardizovat nebo kvantifikovat.

Drsnost povrchu vozovky je předmětem zájmu už od doby, kdy se objevily veřejné komunikace. Některé přístroje pro měření drsnosti byly popsány v předchozí kapitole. Bohužel, data nezískaná měřením vlastního profilu vozovky nemohou být porovnávána s dnešními daty. V minulosti se vyskytovaly také pokusy o subjektivní hodnocení stavu silnice. Neexistuje ale způsob, jak data získaná subjektivním hodnocením skupiny lidí před deseti nebo dvaceti lety porovnávat s hodnotami získanými dnes.

Při jízdě po silnici mohou vznikat velmi odlišné vibrace, vznikající v důsledku rozdílné délky a amplitudy nerovností. Je účelné vypočítat více parametrů drsnosti určitého profilu, pokud poskytují vzájemně nezávislé informace. Existuje ale spousta indexů drsnosti vozovky, jejichž hodnoty spolu silně korelují a neposkytují tak žádné nové informace. Je naprosto bezúčelné počítat dva indexy drsnosti povrchu vozovky, které v podstatě říkají to samé.

4.1 INDEXY DRSNOSTI VOZOVKY

Záznam profilu vozovky je tvořen sérií čísel reprezentujících vzdálenost od určité referenční hladiny. Záznam jednoho kilometru vozovky může obsahovat tisíce čísel. Pro získání informací z tohoto obrovského množství dat je nutné, aby byla naměřená data matematicky zpracována. Vlastnosti profilu jsou poté vyjádřeny jedním číslem, indexem. Způsob výpočtu indexu definuje jeho význam. Ve výpočtu je téměř vždy obsažen matematický filtr pro eliminaci nerovností naměřeného profilu, které z hlediska uvažovaného problému nemají žádný nebo jen zanedbatelný význam. Výpočet parametru drsnosti může např. simulovat pohyb matematického modelu vozidla.

Většina indexů drsnosti vozovky využívá pro svůj výpočet profil měřený pouze v jedné stopě a při měření profilu vozovky v obou jízdních stopách lze vypočítat charakteristiky pro obě stopy zvlášť. Existují ovšem indexy, které pro výpočet vyžadují průběh profilu v obou stopách. Výhodou záznamu průběhu vlastního profilu vozovky je také skutečnost, že jeden záznam je možné opakovaně využít pro výpočet hned několika různých indexů drsnosti.

Vypočítaná hodnota indexu je použitelná pouze v případě, že profilometr použitý k měření profilu je pro tento index vhodný, tzn. data získaná tímto profilometrem obsahují všechny informace ze skutečného profilu, které jsou nezbytné pro výpočet daného indexu drsnosti.

Jakýkoliv index drsnosti má pro libovolný úsek vozovky svou skutečnou hodnotu. Tato hodnota je ta, která by byla získána, pokud by matematický výpočet byl aplikován na skutečný profil.

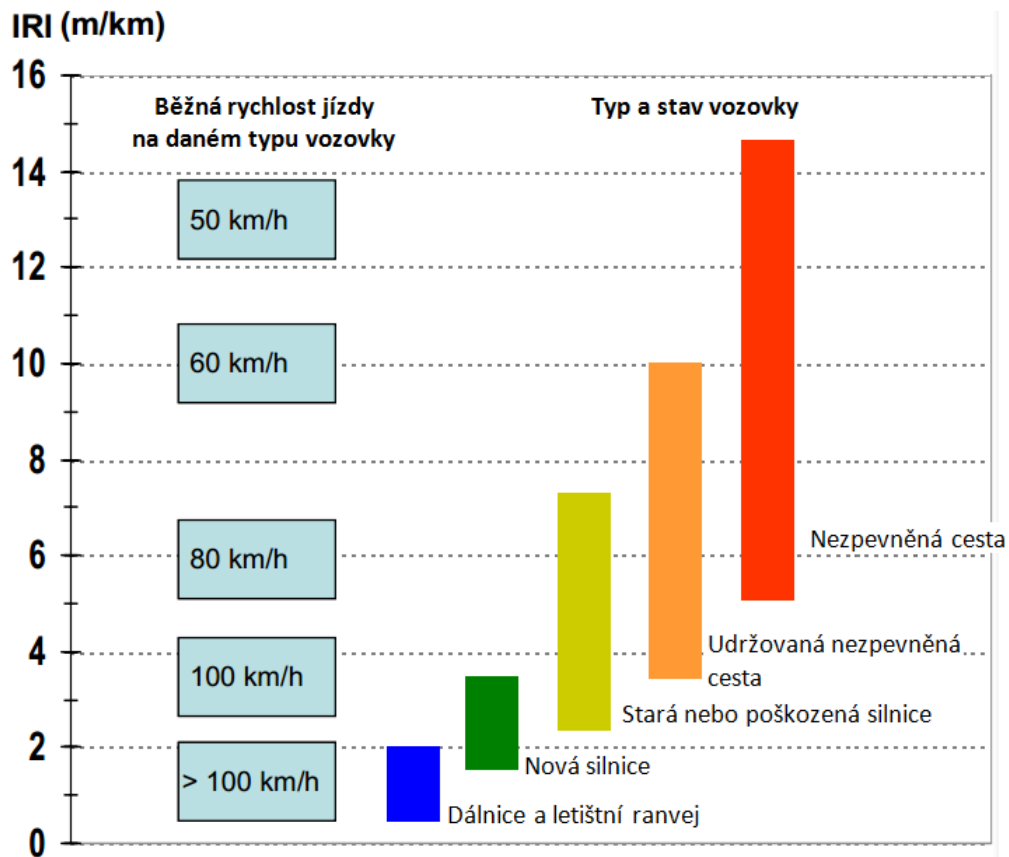
Výhodou hodnocení drsnosti vozovky pomocí indexů drsnosti je skutečnost, že data pro výpočet mohou být získána pomocí jakéhokoli profilometru, který je vhodný pro daný index.



Pokud např. výpočet indexu vyžaduje specifický interval (vzdálenost) mezi naměřenými body, a profilometr není schopen tuto podmínku zajistit, nelze jej v tomto případě použít.

4.1.1 INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX

Téměř všechny automatické profilovací systémy jsou dnes vybaveny softwarem pro výpočet IRI (z angl. International Roughness Index). IRI se stalo prvním indexem drsnosti profilu vozovky, který bylo možné získat za použití různých typů zařízení, profilometrů. Je to jeden ze světově nejrozšířenějších a nejpoužívanějších indexů drsnosti vozovky, který velmi dobře vystihuje vlastnosti, které ovlivňují chování vozidla při jízdě.



Obr. 21 Typické hodnoty IRI pro různé typy vozovky (popis přeložen z angl.) [5]

IRI bylo vytvořeno v době, kdy se pro hodnocení drsnosti povrchu vozovky běžně používala vozidla se systémem RTS, tedy zařízení měřící relativní pohyb nápravy vozu vůči jeho karosérii. Z tohoto důvodu byl algoritmus výpočtu navržen tak, aby vypočítaná hodnota co nejlépe odpovídala hodnotám naměřeným pomocí tohoto typu zařízení. IRI také velmi dobře koreluje s vertikálním zrychlením, kterému jsou vystaveni cestující ve vozidle, a také zatížení mezi kolem a vozovkou.

Rozpětí hodnot IRI pro jednotlivé typy vozovek, jak je znázorněno na obrázku č. 21, je potřeba chápat spíše jako orientační, neboť jednotlivá rozpětí se v různých zdrojích mohou lišit. Neexistuje žádná norma, která by toto rozdělení definovala.



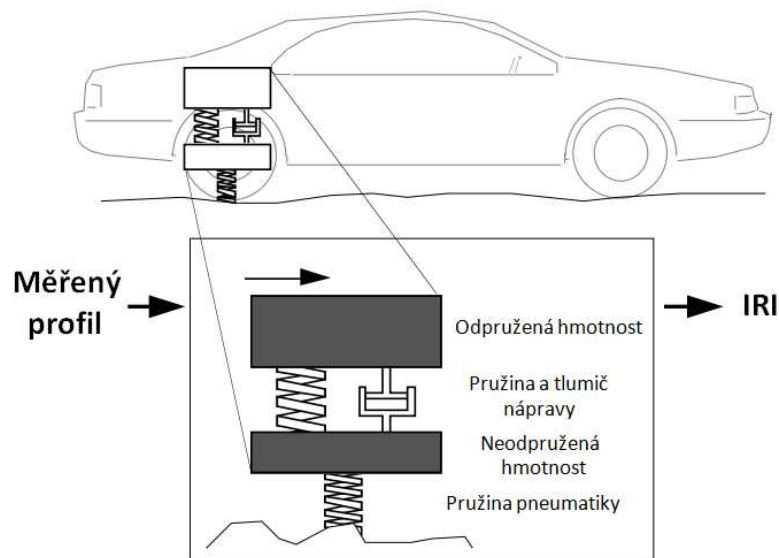
Výpočet IRI využívá simulaci reakce čtvrtinového modelu vozidla při jízdě po naměřeném profilu vozovky. Vlastnosti čtvrtinového modelu jsou navrženy tak, aby jeho dynamické vlastnosti co nejlépe odpovídaly běžným osobním automobilům, pouze tlumení je vyšší. To zabraňuje tomu, aby IRI inklinovalo k určitým vlnovým délkám. Obecný vztah pro výpočet má tvar [15]:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^T |\dot{z}_s - \dot{z}_u| dt, \quad (13)$$

kde L je délka měřeného úseku, T je celkový čas měření a z_s a z_u jsou výchylky odpružené a neodpružené hmoty (ve vztahu jsou použity jejich časové derivace).

Výslednou hodnotu IRI ovlivňují především nerovnosti s vlnovou délkou nacházející se v intervalu od 1,2 do 30 metrů. Ostatní nerovnosti mají spíše zanedbatelný význam. Nejvýrazněji se na výsledné hodnotě projevují nerovnosti s vlnovou délkou kolem 2,4 a 15 metrů.

Při výpočtu IRI jsou naměřené hodnoty profilu nejprve upraveny pomocí matematického filtru. Ten odstraní nerovnosti s velmi krátkou vlnovou délkou. Pro simulaci chování čtvrtinového modelu automobilu je definována rychlost $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Výstupem modelu je relativní pohyb neodpružené hmoty vůči hmotě odpružené. Absolutní hodnoty vychylek jsou sečteny a vztaženy na ujetou vzdálenost.



Obr. 22 Čtvrtinový model automobilu pro výpočet IRI (popisy přeloženy z angl.) [4]

4.1.2 RIDE NUMBER

Ride Number (RN) je index drsnosti vozovky, jehož číselná hodnota koreluje s jízdním komfortem cestujících při jízdě po silnici. Výpočet RN se provádí nelineární transformací indexu PI (z angl. „Profile Index“). Pro výpočet PI se používá velmi podobný algoritmus jako při výpočtu IRI, tedy simulace reakce čtvrtinového modelu automobilu na jízdu po naměřeném profilu vozovky. Parametry čtvrtinového modelu automobilu jsou zde však



zvoleny tak, aby výpočet byl citlivější na nerovnosti s kratší vlnovou délkou. Index RN se z PI vypočítá podle vztahu [4]:

$$RN = 5 \cdot e^{-160 \cdot PI} . \quad (14)$$

Pokud je RN počítáno pouze z jednoho profilu, index PI se dosazuje do vztahu (14) přímo. V případě, že je profil analyzován v pravé i levé jízdní stopě, indexy PI pro každou stopu se zredukuje na hodnotu kvadratického průměru [4]:

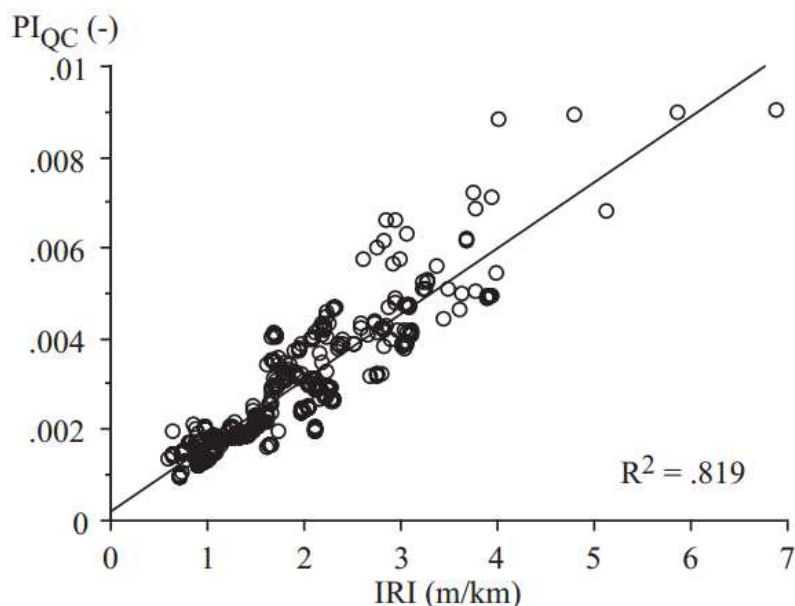
$$PI = \sqrt{\frac{PI_L^2 + PI_P^2}{2}} , \quad (15)$$

kde $PI_{L(P)}$ je hodnota PI pro levou (pravou) jízdní stopu.

Rozsah hodnot indexu RN se pohybuje v rozmezí od 5 do 0, přičemž 5 označuje dokonale rovný povrch vozovky a 0 maximální možnou drsnost vozovky. Experimentálně získané hodnoty se obvykle nacházejí v intervalu od 1 do 4,5.

Největší význam při výpočtu RN mají nerovnosti s vlnovou délkou kolem 6 metrů.

Hodnoty RN a IRI spolu částečně korelují, ale nejsou zaměnitelné. Oba indexy jsou ovlivňovány nerovnostmi s odlišnou vlnovou délkou, takže udávají rozdílné informace o profilu vozovky.



Obr. 23 Korelace mezi indexy PI a IRI [4]

4.1.3 DALŠÍ INDEXY PROFILU

Existuje spousta indexů profilu, ale většina z nich v praxi nenachází uplatnění a to hlavně ze dvou důvodů. Prvním důvodem je skutečnost, že pro jejich výpočet není dostupný software pracující správně s profilometry od různých výrobců. Dalším důvodem je zpravidla jejich



vysoká korelace s IRI. Pokud je totiž známo IRI, jejich určením není o profilu vozovky získána žádná nová informace.

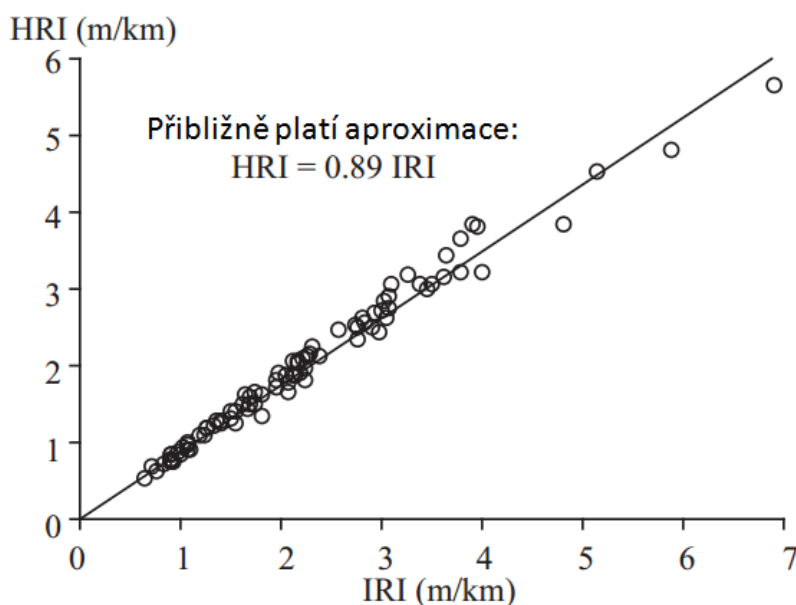
HALF-CAR ROUGHNESS INDEX

HRI (z angl. Half-car Roughness Index) je index drsnosti vozovky využívající pro výpočet stejný algoritmus jako IRI. Rozdíl spočívá v tom, že pro výpočet jsou zapotřebí znalosti průběhu profilů v levé i pravé jízdni stopě, protože výpočet simuluje pohyb polovičního modelu automobilu. Každé dva vzájemně odpovídající si body profilů v obou jízdni stopách se zprůměrují a výsledná hodnota představuje vstupní data pro čtvrtinový matematický model automobilu používaný pro výpočet IRI.

Výhodou tohoto indexu je vyšší korelace výsledků s hodnotami získanými prostřednictvím zařízení typu RTS, nainstalovaných v osobních vozech.

Pokud jsou nerovnosti v levé i pravé jízdni stopě ve stejné fázi, vozidlo je nadnášeno, ale vůbec nedochází k houpání. Pokud ale nerovnosti mají fázi opačnou, tj. jedna strana vozidla se pohybuje dolů a druhá nahoru, dochází pouze ke kolébání. Pokud je zařízení RTS instalováno uprostřed nápravy, zachycuje pouze nadnášení a pohyb ve formě kolébání vůbec nezaznamenává. Hodnota HRI je proto vždy menší nebo rovna indexu IRI.

Pro výpočet HRI je zásadní, aby profily v levé i pravé jízdni stopě byly perfektně synchronizovány. To je možné pouze v případě, že používaný profilometr měří oba profily vozovky současně. V opačném případě by bylo zapotřebí změřené profily synchronizovat po měření, což by bylo velice obtížné.



Obr. 24 Korelace mezi indexy HRI a IRI (popis přeložen z angl.) [4]



5 MĚŘÍCÍ ŘETĚZEC

Aby bylo možné objektivně hodnotit drsnost vozovky, je zapotřebí zaznamenat tvar jejího profilu. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, v minulosti bylo pro tento účel vyvinuto mnoho různých typů zařízení. Některé se používají dodnes a s dalším rozvojem měřicí techniky se stále vyvíjejí nové. Převládajícím typem měřících systémů pro měření profilu vozovky jsou dnes inerciální profilometry s laserovými snímači vzdálenosti. Na tomto typu zařízení je také založen měřicí řetězec a vůbec celkový koncept měřícího systému.

5.1 MĚŘENÉ VELIČINY

Při každém měření profilu vozovky je zapotřebí zajistit tyto tři aspekty:

1. Stanovení referenční hladiny, vůči které bude profil vozovky měřen.
2. Měření vzdálenosti povrchu vozovky vůči referenční hladině.
3. Měření ujeté vzdálenosti.

Při návrhu měřícího řetězce byla vybrána měřicí technika, která se nachází v laboratořích ÚADI na FSI VUT v Brně a která byla využita i při experimentálním měření provedeným v rámci této diplomové práce.

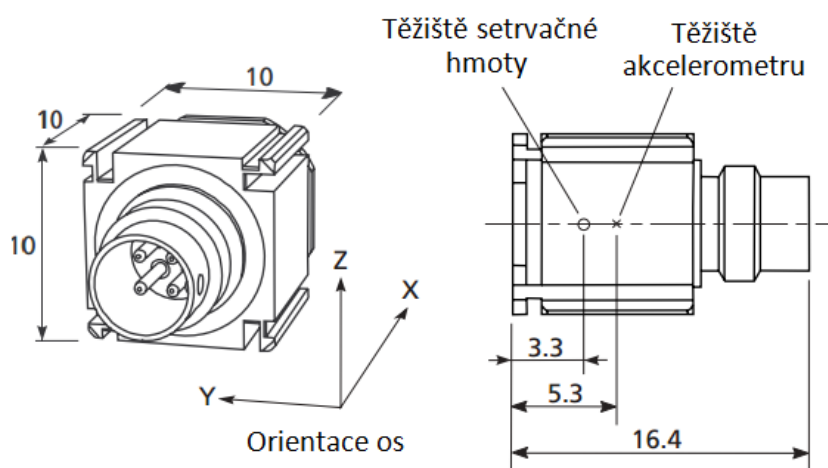
5.1.1 ZAJIŠTĚNÍ REFERENČNÍ HLADINY

U inerciálního profilometru je referenční hladina udržována pomocí senzoru zrychlení neboli akcelerometru. Z naměřených hodnot svislého zrychlení odpružené hmoty se pomocí numerické integrace vypočítá její vertikální výchylka v průběhu měření. Tento způsob je vhodný pro měření profilu vozovky za účelem analýzy její drsnosti, ale nehodí se pro měření profilu vozovky za účelem vyhodnocení jejího sklonu nebo delších nerovností.

AKCELEROMETR BRÜEL & KJÆR, TYP 4524

Akcelerometry ze série 4524 od společnosti Brüel & Kjær představují miniaturní piezoelektrické akcelerometry. Nacházejí uplatnění např. při studiu dynamických vlastností konstrukcí (součástí) vystavených působení vibrací, tzv. modální analýze. Senzor měří zrychlení ve třech vzájemně kolmých osách.

Mezi výhody tohoto snímače zrychlení patří především jeho velmi malé rozměry a hmotnost, která nedosahuje ani 5 gramů. Velkou výhodou tohoto akcelerometru je také možnost připevnění k držáku pěti různými stranami, což může v mnoha případech značně usnadnit jeho umístění a montáž.



Rozměry jsou uvedeny v milimetrech

Obr. 25 Akcelerometr B&K, typ 4524 (popis přeložen z angl.) [9]



Obr. 26 Ukázka umístění akcelerometru B&K [9]

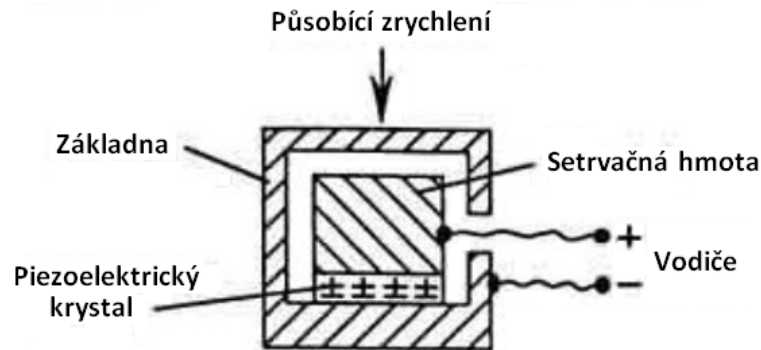
Tab. 1 Parametry akcelerometru B&K, typ 4524 [9]

Měřicí rozsah	$\pm 500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ($\pm 50 \text{ g}$)
Napájení	24 až 30 V DC
Pracovní teplota	-54 až 100 °C



FUNKCE PIEZOELEKTRICKÉHO AKCELEROMETRU

Piezoelektrický akcelerometr využívá při měření zrychlení piezoelektrického jevu. V důsledku vnějšího silového působení na krystal piezoelektrického materiálu se tento krystal deformuje a jednotlivé ionty v krystalové mřížce mění svou polohu. To se projevuje přítomností elektrického náboje na ploše krystalu.



Obr. 27 Schéma piezoelektrického akcelerometru (popis přeložen z angl.) [8]

Základna akcelerometru je upevněna na povrchu měřeného objektu. Deformace piezoelektrického krystalu a tím také vznikající elektrický náboj jsou úměrné relativnímu pohybu setrvačné hmoty akcelerometru vůči jeho základně. Vznikající náboj se postupně vybíjí, proto piezoelektrický akcelerometr nelze použít pro měření statického zrychlení nebo kmitání s frekvencí nižší než 0,1 Hz.

5.1.2 MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI POVRCHU VOZOVKY VŮČI REFERENČNÍ HLADINĚ

Pro měření výšky profilu vozovky lze využít čtyři druhy senzorů: laserový, optický, infračervený a ultrazvukový. Nejčastěji se používají senzory laserové. Ultrazvukové snímače nepracují dobře na drsnějších cestách a optické senzory jsou citlivé na bílé značení na vozovce.

SNÍMAČ VÝŠKY CORRSYS DATRON HT-250

Laserový snímač HT-250 od firmy Corrsys Datron se běžně používá pro měření v oblasti dynamiky vozidel, např. pro určení jízdní výšky, klopení vozidla nebo odklon kola. Senzor využívá k určení vzdálenosti optické triangulace.

OPTICKÁ TRIANGULACE

Bod laserového paprsku je promítán na povrch daného objektu, např. povrch vozovky. Obraz tohoto bodu je zaznamenán pomocí CCD senzoru, což je elektronická součástka citlivá na světlo. V důsledku změny vzdálenosti objektu vůči snímači se mění úhel, pod kterým CCD



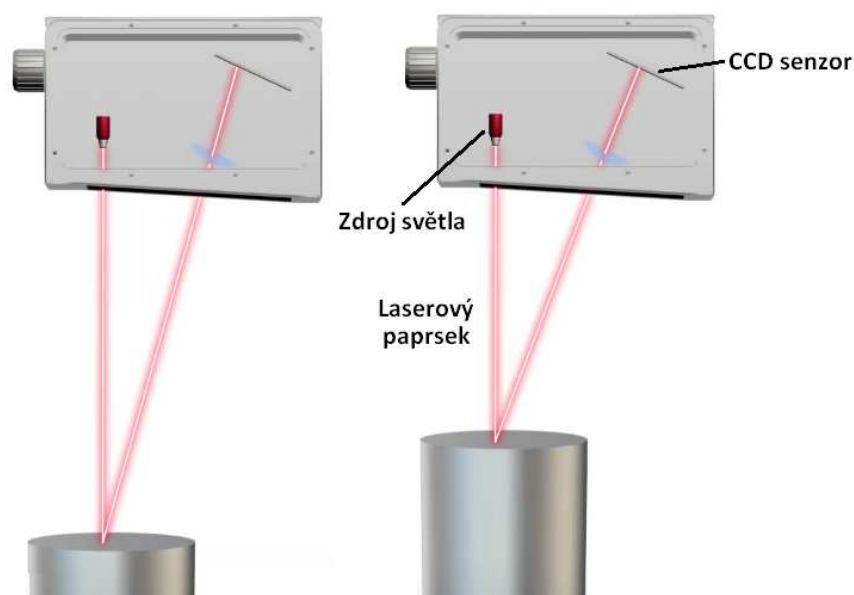
senzor zaznamenává obraz laserového bodu. Zjišťovaná vzdálenost je poté určena z velikosti změny tohoto úhlu.

Tab. 2 Parametry senzoru Corrsys Datron HT-250 [11]

Zdroj světla	laser ($\lambda = 660 \text{ nm}$)
Měřicí rozsah	80 až 330 mm
Rozlišení	0,1 mm
Přibližná velikost světelné skvrny	1 mm x 2 mm
Napájecí napětí	9 až 18 V DC
Provozní teplota	-10 až 60 °C



Obr. 28 Ukázka měření odklonu kola za použití dvojice senzorů Corrsys Datron HT-250 [11]



Obr. 29 Princip optické triangulace [10]

5.1.3 MĚŘENÍ UJETÉ VZDÁLENOSTI

Pro určení ujeté vzdálenosti lze využít záznamu rychlosti jízdy vozidla a z této pak numerickou integrací dopočítat ujetou vzdálenost. Mezi bezkontaktní senzory rychlosti patří např. optické senzory a senzory založené na Dopplerově jevu. Optické senzory se vyznačují vyšší přesností, kolem $0,1 \text{ km h}^{-1}$.

Jiným způsobem záznamu ujeté vzdálenosti je použití zařízení, využívajícího polohovací systém GPS (Global Positioning System), které poskytuje přímé informace o ujeté vzdálenosti. Mimo to navíc poskytuje informace o rychlosti a zeměpisných souřadnicích.

OXTS RT3002

Inerciální navigační systém od společnosti OXTS představuje moderní nástroj pro přesné měření pohybu vozidla. Systém zahrnuje GPS přijímač, tři senzory úhlové rychlosti a tři akcelerometry. Zařízení pracuje jako samostatná autonomní jednotka.



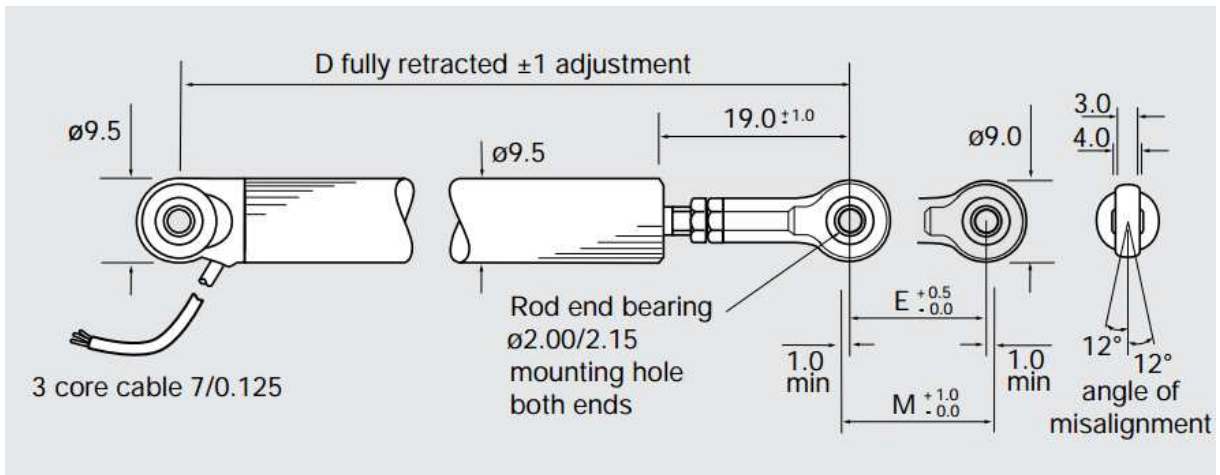
Obr. 30 Inerciální navigační systém OXTS RT3002 [12]

5.2 MĚŘENÍ RELATIVNÍ VZDÁLENOSTI MEZI KAROSERÍ A NÁPRAVOU

Záznam relativní vzdálenosti mezi odpruženou a neodpruženou hmotou slouží pro porovnání experimentálně naměřených dat s hodnotami získanými matematickou simulací čtvrtinového modelu automobilu. Tato část měřicího řetězce je zařazena pouze pro potřeby validace navrhované metodiky hodnocení drsnosti vozovky a pro záznam průběhu nerovností povrchu vozovky nemá žádný význam. Pro záznam relativní výchylky nápravy vůči karoserii lze využít např. lineární potenciometr reagující na délkové posunutí.

SNÍMAČ POSUNUTÍ PENNY+GILES SLS095

Lineární potenciometry od firmy Penny+Giles jsou navrženy přímo pro použití v motosportu. Dosahují velmi dobré přesnosti měření a odolávají i těm nejextrémnějším vnějším podmínkám.



Obr. 31 Schéma lineárního potenciometru Penny+Giles [19]

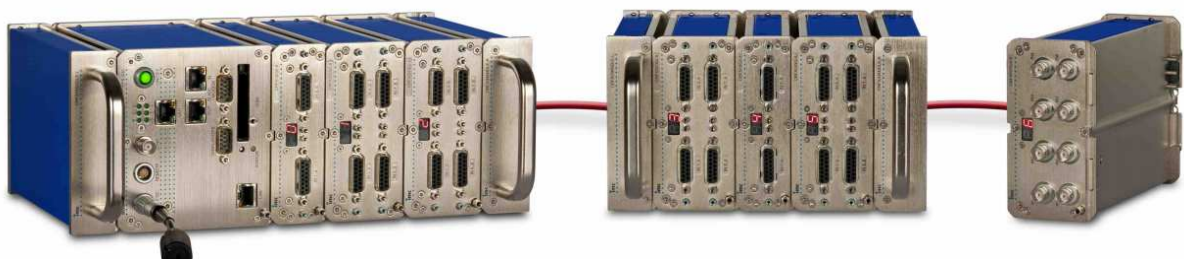
5.3 VÝPOČETNÍ TECHNIKA

Jednotlivé senzory, které sledují průběhy požadovaných fyzikálních veličin, převádějí tyto veličiny na spojitý signál ve formě elektrického napětí, v některých případech elektrického proudu. Aby bylo možné s těmito daty později pracovat a vyvozovat z nich jakékoliv závěry, je zapotřebí převést analogový signál na signál digitální, který pak bude uložen na záznamové médium.

MĚŘÍCÍ SYSTÉM IMC CRONOS FLEX

Jedná se o moderní měřicí systém skládající se ze základní jednotky, tzv. Base-Unit, a měřících modulů. Tyto moduly přijímají a zpracovávají signály z jednotlivých senzorů v měřicím řetězci a jejich počet závisí na množství kanálů v měřicím řetězci. Systém je navržen tak, aby se jednotlivé součásti spojily pouhým secvaknutím jako stavebnice. V případě nutnosti je možné i spojení prostřednictvím kabelů typu Ethernet a to na vzdálenost až 100 metrů.

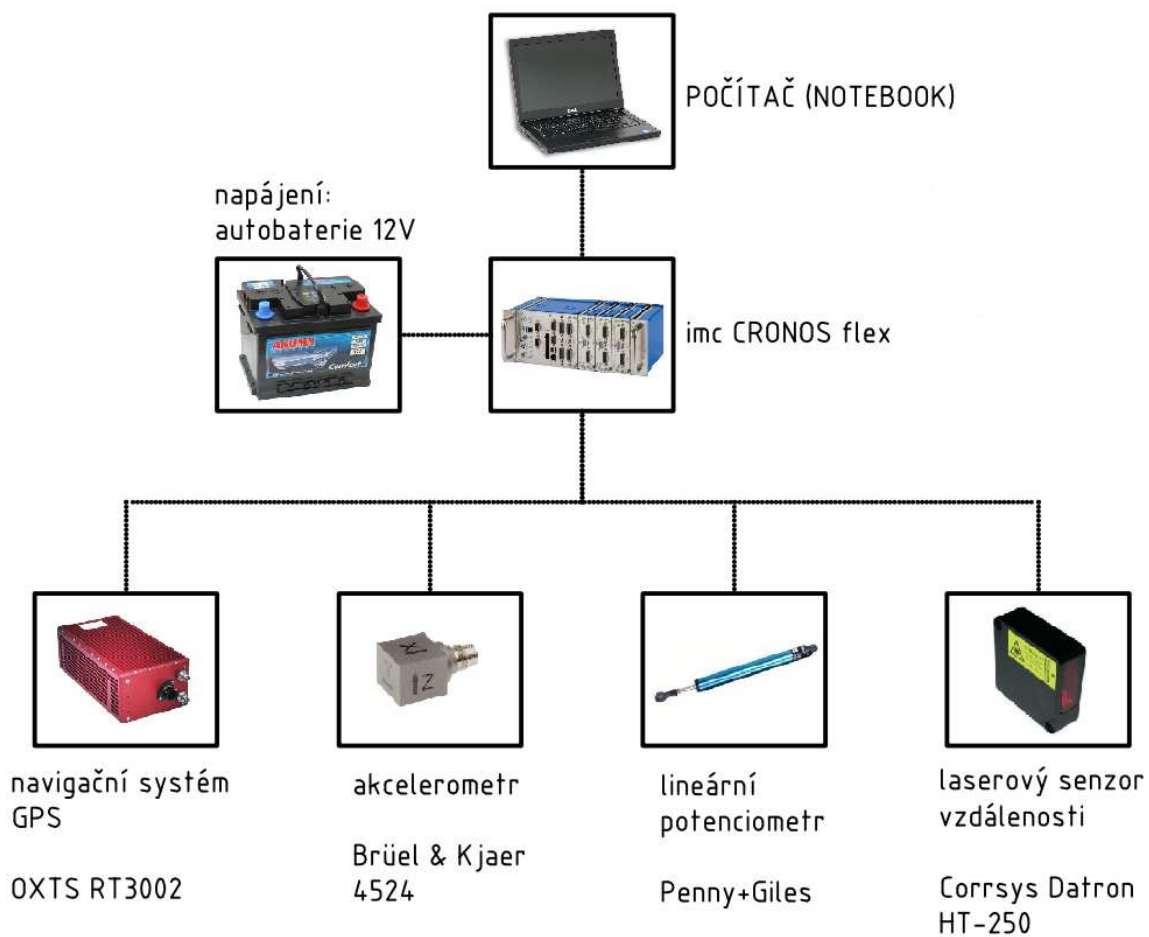
Základní jednotka je vybavena vlastním úložným prostorem pro naměřená data, ale umožňuje také ukládání dat do počítače prostřednictvím bezdrátové sítě WLAN (Wi-Fi) nebo za pomoci Ethernet kabelu.



Obr. 32 Měřicí systém imc CRONOS flex [13]



5.4 BLOKOVÉ SCHÉMA MĚŘÍCÍHO ŘETĚZCE



Obr. 33 Blokové schéma měřicího řetězce použitého při experimentálním měření

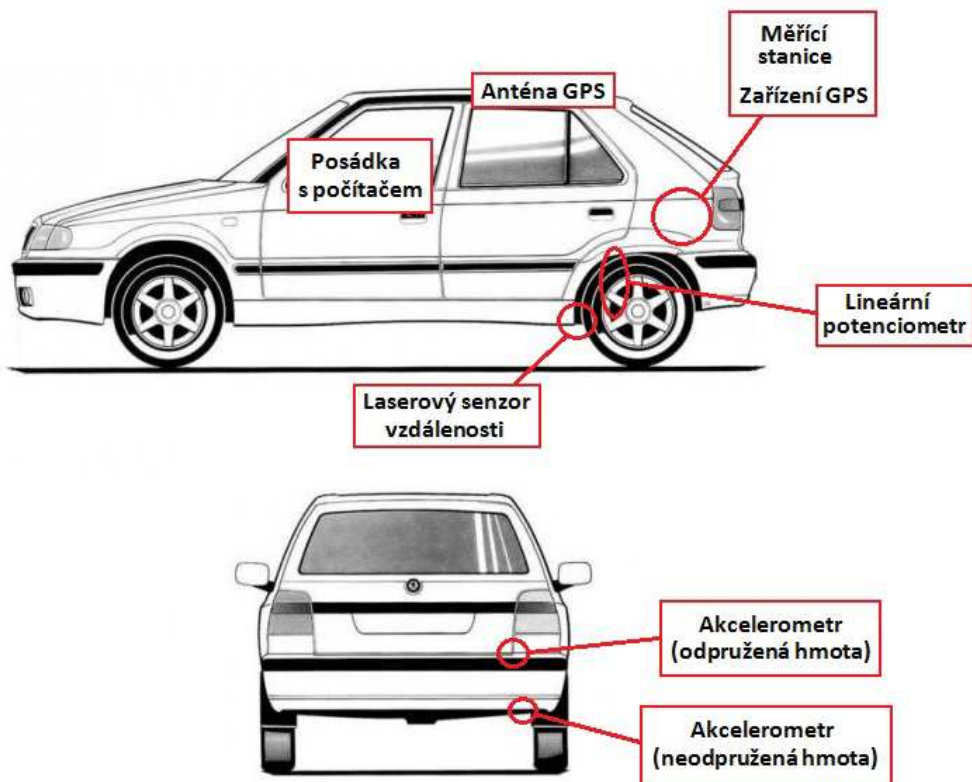


6 EXPERIMENT

Hlavním cílem tohoto experimentálního měření bylo získání dat ze skutečného povrchu vozovky, která pak budou analyzována za použití navrženého matematického modelu. Měření bylo provedeno za použití senzorů a výpočetní techniky uvedené v předchozí kapitole.

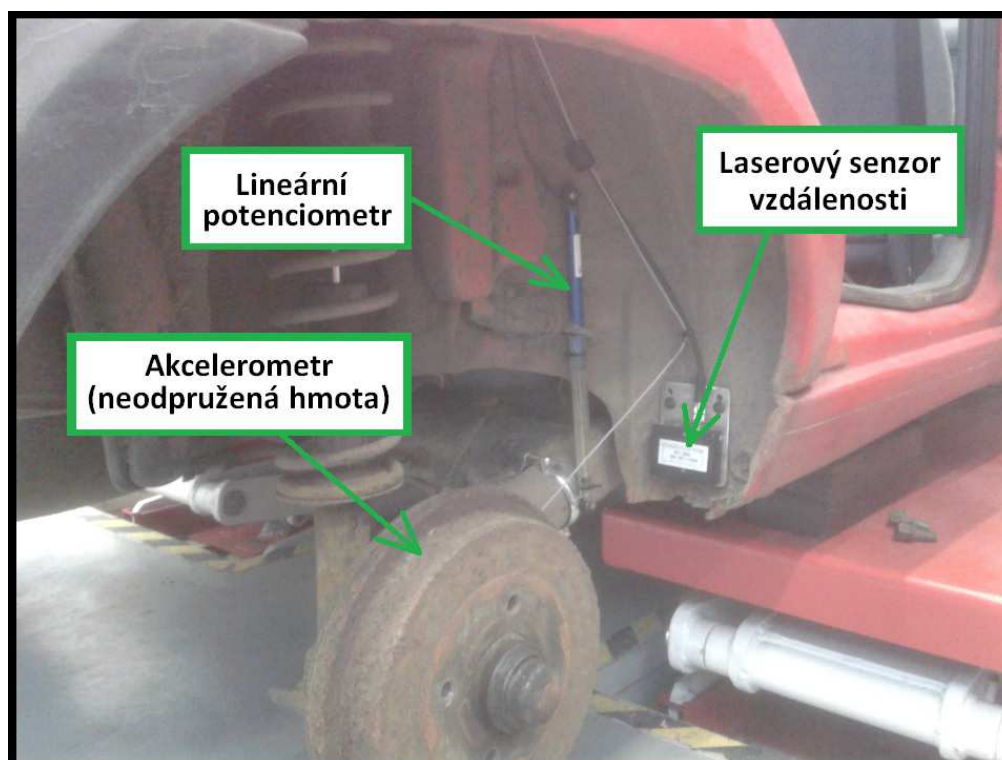
6.1 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Příprava měření zahrnovala umístění jednotlivých senzorů na měřící vozidlo (Škoda Felicia), jejich zapojení do příslušných výpočetních modulů propojených se základní jednotkou měřící stanice a otestování správné funkce měřícího systému. Ovládání systému spolu se záznamem hodnot měřených veličin bylo provedeno za pomoci notebooku vybaveného softwarem pro práci s příslušnou měřící stanicí.

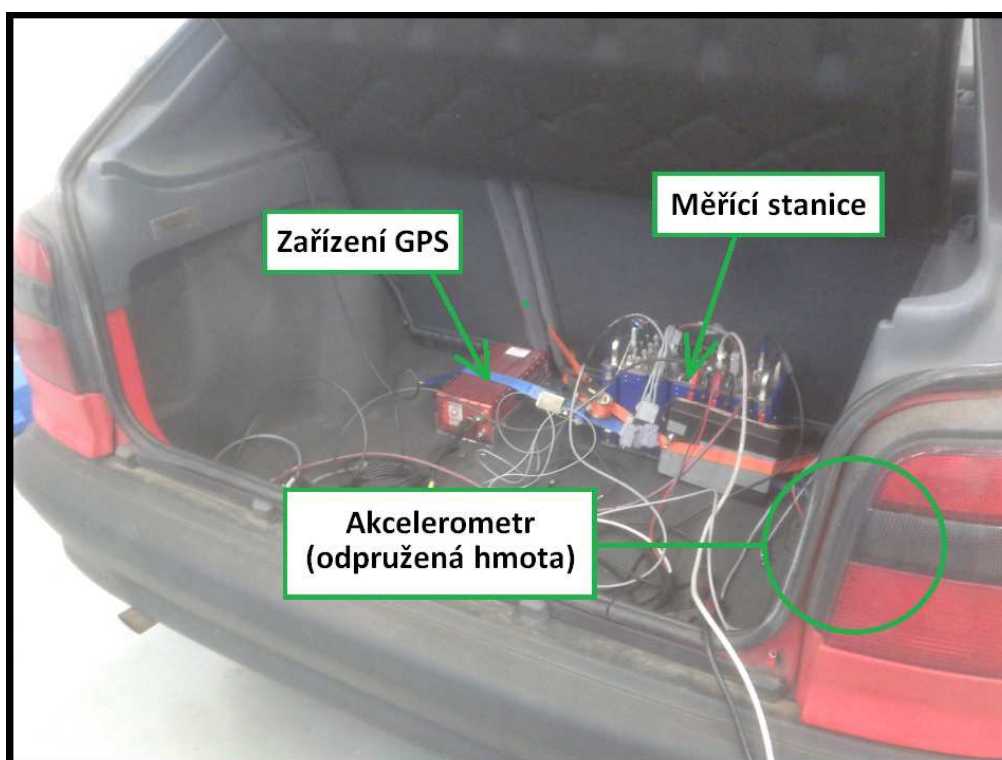


Obr. 34 Schéma rozmístění jednotlivých částí měřícího řetězce na vozidle Škoda Felicia [22]

Při montáži jednotlivých senzorů bylo zapotřebí respektovat jejich funkční limity. U lineárního potenciometru bylo potřeba zajistit, aby při měření nedošlo v důsledku nadměrného pohybu nápravy k jeho poškození. Aby bylo možné data z lineárního potenciometru využít při matematickém zpracování naměřených dat, je zapotřebí určit skutečný vztah mezi relativním pohybem nápravy vůči karoserii a pohybem lineárního potenciometru. Tento krok byl proveden po skončení měření a spočíval v záznamu hodnot posunutí z potenciometru a změření vzdálenosti mezi karoserií a nápravou v daném místě na měřícím vozidle. Tabulka hodnot pro převod těchto dat je součástí přílohy (složka MATLAB).



Obr. 35 Umístění senzorů na měřicím vozidle



Obr. 36 Umístění měřicí stanice a zařízení GPS v měřicím vozidle



6.2 REALIZACE

Měření probíhala na několika různých lokalitách se záměrem získat reprezentativní vzorky dat profilů silnic s různým technickým stavem. Na lokalitě ulice Kolejní bylo provedeno několik měření stejného úseku s cílem ověření přesnosti (opakovatelnosti) analýzy za použití navrhovaného měřicího systému a výpočetní metodiky. Naproti tomu na lokalitě Moravské Knínice byla měření prováděna při různých rychlostech pro ověření vlivu rychlosti měřicího vozidla na naměřená data.

Rychlost měřicího vozidla nebyla při měření pro všechny testované úseky stejná. Limitujícím faktorem na některých úsecích je při měření tohoto typu odlišný technický stav měřených úseků. Stará neudržovaná cesta neumožňuje provedení měření při stejné rychlosti jako je možné na dálnici. Dalším omezením je také dopravní situace na dané lokalitě a samozřejmě zákon o silničním provozu.



7 MATEMATICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Pro analýzu povrchu vozovky je zapotřebí nejprve naměřená data matematicky zpracovat a sestavit z nich průběh profilu vozovky měřeného úseku. Konkrétně se jedná o data z laserového snímače, akcelerometru a GPS. Vytvořený profil je poté analyzován s důrazem na ty nerovnosti, které ovlivňují chování vozidla a pohodlí cestujících při jízdě.

Zpracování a vyhodnocení dat v této diplomové práci využívá softwaru Matlab a jeho nástavby Matlab/Simulink. Jedná se o komerční software, který lze dnes považovat za standard pro simulace a technické výpočty v oblasti průmyslu a výzkumu. Vývojářem softwaru Matlab je americká společnost MathWorks.

Hodnocení drsnosti vozovky je v této diplomové práci provedeno porovnáním výkonových spektrálních hustot jednotlivých úseků a výpočtem indexů drsnosti vozovky IRI a RN.

7.1 VYTVOŘENÍ PROFILU VOZOVKY

UJETÁ DRÁHA

Při měření jsou data zaznamenávána s předem definovanou vzorkovací frekvencí. Protože rychlost vozidla se při měření může měnit, nebo jsou jednotlivá měření prováděna při různých rychlostech, není délková vzdálenost mezi jednotlivými naměřenými body obecně konstantní. Pro odstranění tohoto problému lze využít záznam ujeté dráhy. Celková dráha je rozdělena na množinu bodů vzdálených od sebe o určitou konstantní vzdálenost. Za použití lineární interpolace s naměřenými daty jsou pak vypočítány hodnoty času v daných bodech.

Za účelem interpolace dat je v této diplomové práci využita funkce *interp1*. Základní syntaxe této funkce je [18]:

$$vq = \text{interp1}(x, v, xq, 'method'), \quad (16)$$

Tato funkce vypočítá hodnoty vektoru vq v bodech xq interpolací vektoru v v bodech x . Přednastavenou metodou pro výpočet je lineární interpolace ($method = linear$), která je rovněž použita i zde při zpracování dat.

DATA Z LASEROVÉHO SNÍMAČE

Data z laserového snímače představující výšku profilu vozovky jsou interpolována do bodů, které jsou získány v předchozím kroku. Výsledkem je aproximace průběhu zkoumaného profilu v bodech s předem stanoveným intervalem. Část informace je v důsledku tohoto kroku ztracena, ale při volbě dostatečně krátké vzdálenosti mezi jednotlivými body je tento vliv z hlediska řešeného problému zanedbatelný.



DATA Z AKCELEROMETRU

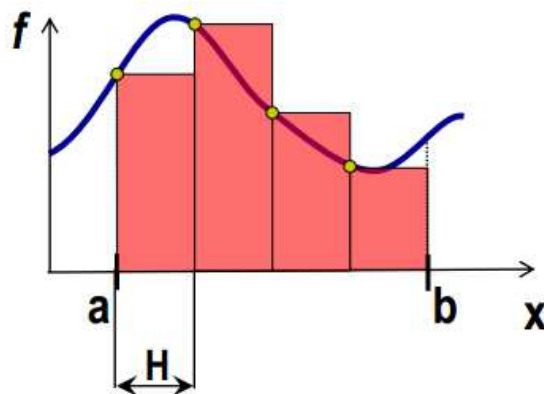
Protože referenční hladina není při jízdě konstantní, ale v průběhu měření se vůči povrchu vozovky vertikálně pohybuje, je zapotřebí tento nežádoucí vliv kompenzovat. K tomuto účelu slouží data získaná pomocí senzoru zrychlení.

Získaný průběh zrychlení ve vertikálním směru je numericky integrován. Tím je vypočítán průběh svislé rychlosti. Pro získání průběhu výchylky referenční hladiny vůči povrchu vozovky je zapotřebí provést numerickou integraci ještě jednou, tentokrát na vypočítaný průběh rychlosti. Výsledkem integrace je výchylka referenční hladiny v čase. Pro získání hodnoty výchylky v požadovaných bodech je provedena interpolace vypočítaného průběhu stejně jako u dat z laserového snímače.

Pro numerickou integraci lze využít metodu levého odhadu, jejíž princip je patrný z obrázku č. 37. Funkce je definovaná vztahem [17]:

$$I = \sum_{j < k} L_j = H \sum_{j < k} f(a_j) = \sum_{j < k} f(a + jH), \quad (17)$$

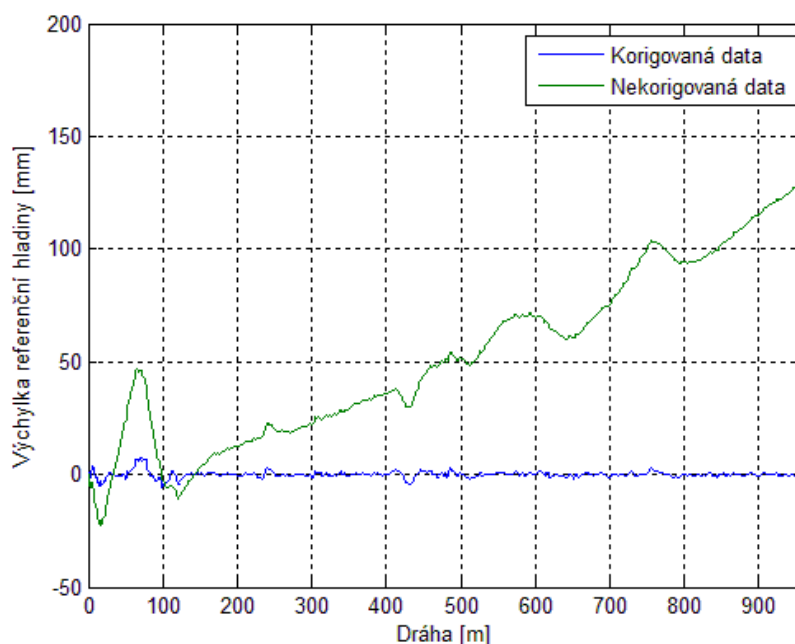
kde H představuje krok integrace.



Obr. 37 Princip numerické integrace – metoda levého odhadu [17]

Vypočítaná výchylka referenční hladiny je zatížena chybou, v jejímž důsledku má stoupavý nebo klesající charakter, jak znázorňuje obrázek č. 38. Pro korekci dat je možné využít matematický filtr. V tomto případě byl použit filtr zvaný „klouzavý průměr“, jehož funkce bude probrána dále.

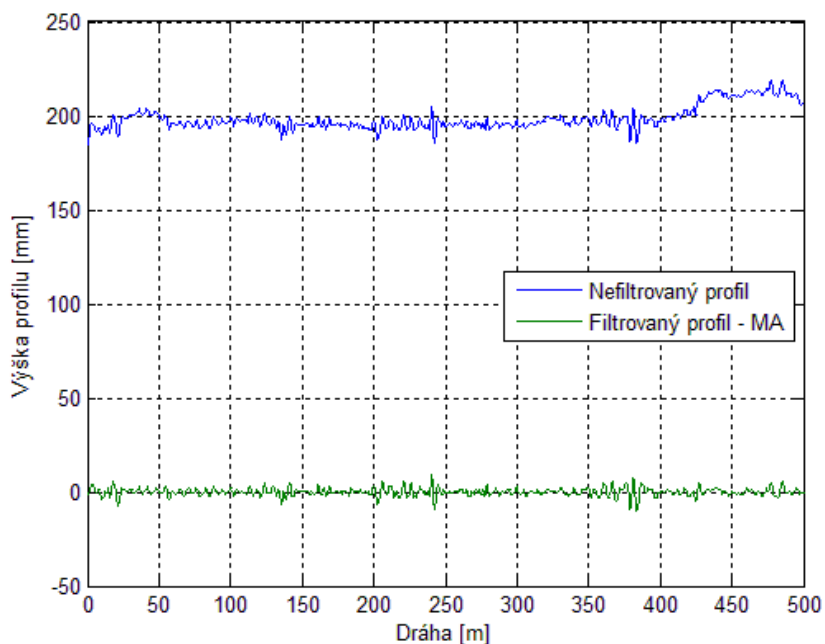
Výsledný profil je výsledkem rozdílu mezi interpolovanými daty z laserového senzoru výšky a průběhu svislé výchylky referenční hladiny vypočítané z průběhu zrychlení.



Obr. 38 Porovnání vypočítané výchylky referenční hladiny bez korekce a s korekcí

7.2 FILTRACE

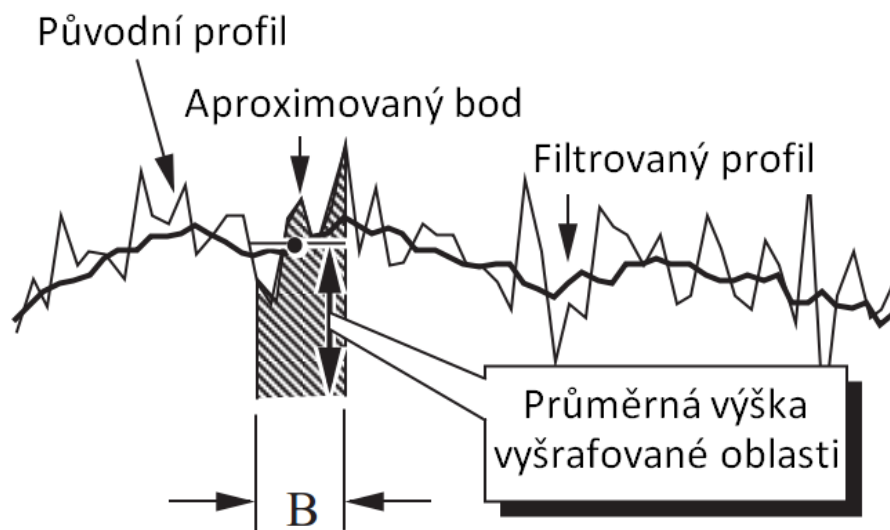
Vypočítaný průběh profilu vozovky je zapotřebí dále zpracovat pomocí matematického filtru. Na obrázku č. 39 lze pozorovat porovnání průběhu nefiltrovaného profilu a profilu filtrovaného pomocí funkce klouzavý průměr. Data původního profilu jsou posunuta o výšku umístění laserového snímače v měřicím vozidle a obsahují nerovnosti o vlnové délce, které nemají vliv na jízdní vlastnosti a pohodlí cestujících ve vozidle. Konkrétně se jedná o nerovnosti s vlnovou délkou mimo interval 1 až 30 metrů. Inerciální profilometry navíc nedokáže měřit stoupání vozovky a delších nerovností, takže tato informace v původním nefiltrovaném profilu je zpravidla chybná a je třeba ji odstranit spolu s ostatními nepřesnostmi.



Obr. 39 Porovnání nefiltrovaného a filtrovaného profilu (MA – Moving Average Filtr)

KLOUZAVÝ PRŮMĚR

Klouzavý průměr, v angl. literatuře označovaný jako „Moving Average“, představuje matematický filtr běžně využívaný pro analýzu profilu vozovky. Uplatňuje se především při grafickém znázornění průběhu profilu vozovky. Princip této funkce spočívá v tom, že každý bod profilu je nahrazen aritmetickým průměrem jeho sousedních bodů, které se nacházejí v definovaném intervalu B (z angl. *Baselength*).



Obr. 40 Princip matematického filtru „Klouzavý průměr“ (popis přeložen z angl.) [4]



Matematický výpočet probíhá podle vztahu [4]:

$$p_{fL}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=i-\frac{B}{2\Delta X}}^{i+\frac{B}{2\Delta X}} p(j), \quad (18)$$

kde p_{fL} je filtrovaný profil, N je počet bodů v intervalu B a ΔX představuje vzdálenost mezi jednotlivými body. Písmeno L v označení filtrovaného profilu p_{fL} je zkratkou z angl. „Low-pass“. Filtr z průběhu profilu odstraňuje nerovnosti s velmi krátkou vlnovou délkou, přičemž mez propustnosti je ovlivněna volbou intervalu B .

Při použití klouzavého průměru pro odstranění stoupání vozovky a nerovností s velkou vlnovou délkou je zapotřebí zvolit vysokou hodnotu intervalu B a vyhlazený profil odečíst od původního nefiltrovaného profilu. Vztah pro výpočet tak nabývá tvaru [4]:

$$p_{fH}(i) = p(i) - \frac{1}{N} \sum_{j=i-\frac{B}{2\Delta X}}^{i+\frac{B}{2\Delta X}} p(j), \quad (19)$$

kde p_{fH} je filtrovaný profil a písmeno H v označení je zkratkou z angl. „High-pass“, neboli filtr, který propouští nerovnosti s malou vlnovou délkou.

Hodnota intervalu B je volitelná a její hodnota se odvíjí od zamýšleného využití dat. Výpočet konkrétních obecně používaných indexů drsnosti povrchu vozovky ale vyžaduje použití intervalu B o určité délce, čímž je zajištěn stejný způsob výpočtu a vzájemná porovnatelnost dat.

Klouzavý průměr je velice jednoduchý matematický filtr. Je snadno programovatelný a jednoduchý pro představu a jeho největší výhodou je malá výpočtová náročnost.

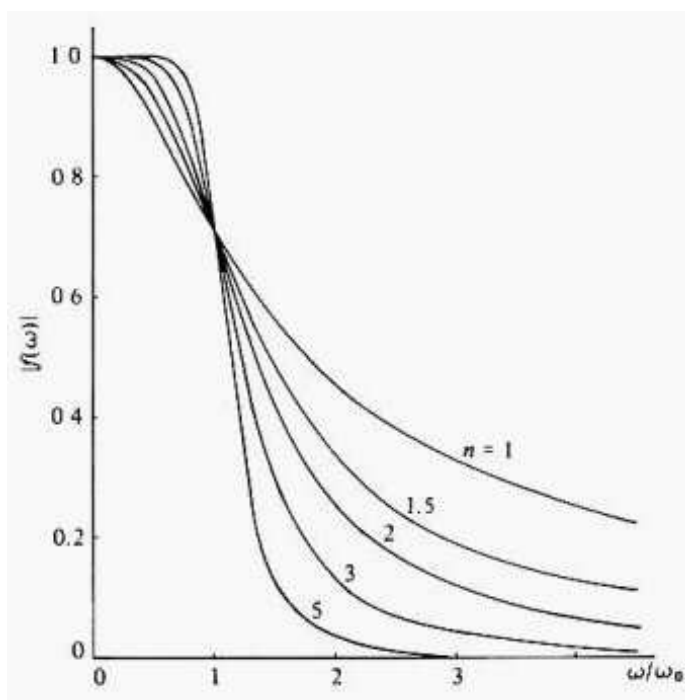
V prostředí Matlab lze pro filtraci typu klouzavý průměr využít např. funkci *smooth* [18]:

$$yy = \text{smooth}(y, \text{span}, 'method'), \quad (20)$$

kteřá vrací vektor yy , filtrovaný průběh dat původního vektoru y . Parametr *span* určuje počet sousedních bodů, které jsou použity pro výpočet každého bodu vektoru yy . Standardně se výpočet funkce provádí za použití metody *'moving'*, která představuje normální klouzavý průměr popsany v předchozím odstavci.

BUTTERWORTHŮV FILTR

Butterworthův filtr patří do skupiny IRR filtrů, tj. do skupiny filtrů s nekonečnou impulzní odezvou. Jedná se o jeden z nejběžněji používaných nízkofrekvenčních filtrů. Jeho amplitudová frekvenční charakteristika je v oblasti pásma propustnosti maximálně plochá a fázové zkreslení je minimální. Strmost klesání amplitudové frekvenční charakteristiky je definována řádem filtru, nicméně pokud je frekvence rovna frekvenci kritické, je tato potlačena o 3 dB bez ohledu na řád filtru.



Obr. 41 Frekvenční odezva Butterworthova filtru [16]

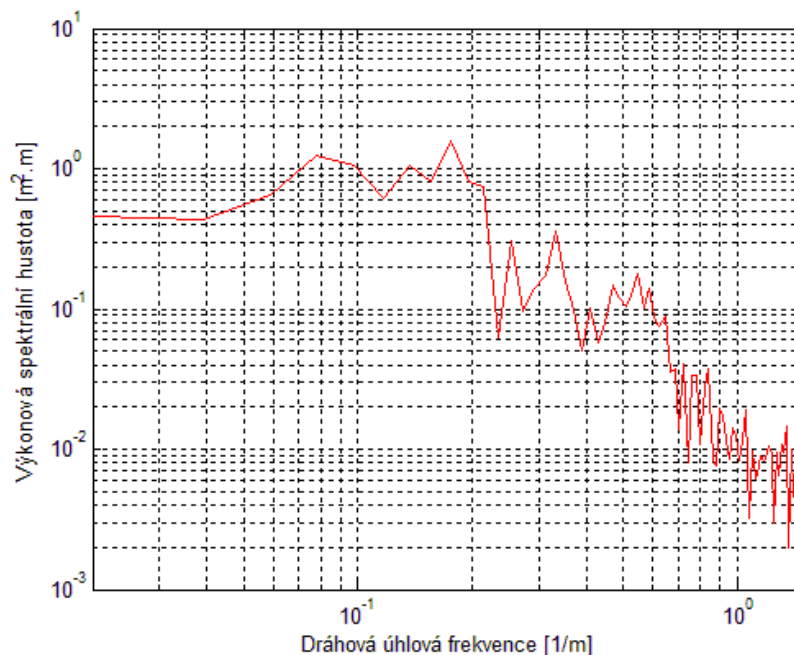
7.3 VÝKONOVÁ SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA

Pro převod signálu z časové domény do domény frekvenční se v prostředí Matlab využívá funkce *fft* [18]:

$$Y = \text{fft}(x, n). \quad (21)$$

Tato funkce vypočítá diskrétní Fourierovu transformaci (DFT) vektoru x pomocí algoritmu rychlé Fourierovy transformace. Index n určuje počet prvků vektoru Y .

Při analýze profilu vozovky funkce *fft* převádí signál z dráhové závislosti na závislost dráhové úhlové frekvence.



Obr. 42 Ukázka PSD analýzy naměřeného profilu vozovky vytvořená v prostředí Matlab za pomoci funkce `fft`

7.4 VÝPOČET IRI

Výpočet hodnoty IRI je založen na simulaci přejezdu čtvrtinového modelu automobilu po nerovném povrchu vozovky, jehož tvar byl zjištěn experimentálním měřením. Mechanické vlastnosti matematického modelu jsou definovány pomocí standardu, tzv. „Golden Car“, který byl vytvořen v 70. letech a byl navržen tak, aby vypočítané hodnoty co nejvíce korelovaly s hodnotami získanými pomocí měřících systémů RTS (viz kapitola 3.3). Výpočet simuluje přejezd čtvrtinového modelu rychlostí $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

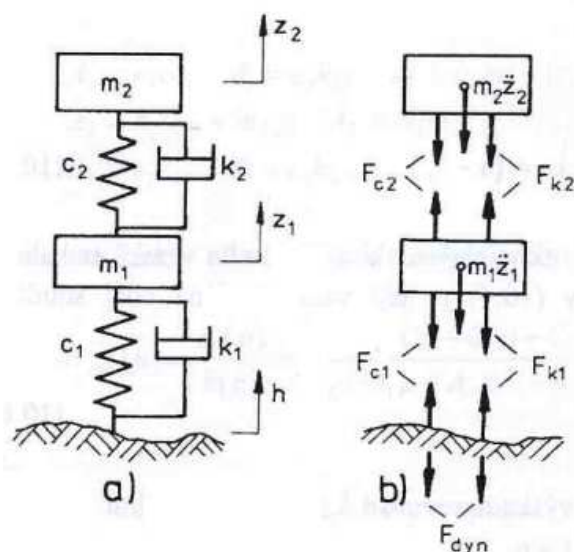
Ze vztahu (13) lze vidět, že výsledná hodnota představuje součet absolutních hodnot relativní výchylky odpružené hmoty vůči hmotě neodpružené, vztažený na celkovou dráhu.

7.4.1 ČTVRTINOVÝ MODEL AUTOMOBILU

Čtvrtinový model automobilu představuje kmitavou soustavu se dvěma stupni volnosti, která se skládá z odpružené a neodpružené hmoty, dvou pružin a tlumení.

ODVOZENÍ POHYBOVÝCH ROVNIC

Diferenciální rovnice matematického modelu lze odvodit uvolněním odpružené a neodpružené hmoty a vyjádřením jejich vzájemného silového působení.



Obr. 43 Čtvrtinový model vozidla – dynamický model se 2 stupni volnosti [1]

Zavedením následujícího značení: hmotnost odpružené hmoty m_2 , hmotnost neodpružené hmoty m_1 , tuhost pružiny c_2 , součinitel tlumení tlumiče k_2 , radiální tuhost pneumatiky c_1 , součinitel tlumení pneumatiky k_1 a výška nerovností vozovky $h = z_0$, pak podle [1] (s. 201-202) lze odvodit tvar hledaných rovnic:

Mezi tělesem s hmotností nástavby m_2 a tělesem s hmotností nápravy m_1 působí pružící a tlumící síly

$$F_{c_2} = c_2 \cdot z_{2rel}; F_{k_2} = k_2 \cdot \dot{z}_{2rel}. \quad (22)$$

Pneumatika přenáší síly

$$F_{c_1} = c_1 \cdot z_{1rel}; F_{k_1} = k_1 \cdot \dot{z}_{1rel}. \quad (23)$$

Pro relativní výchylky platí

$$z_{2rel} = z_2 - z_1; z_{1rel} = z_1 - h. \quad (24)$$

Pohybové rovnice soustavy zní

$$-m_2 \ddot{z}_2 - F_{k_2} - F_{c_2} = 0$$

$$-m_1 \ddot{z}_1 + F_{k_2} + F_{c_2} - F_{k_1} - F_{c_1} = 0$$

a po dosazení rov. (16) až (18)

$$m_2 \ddot{z}_2 + k_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_2(z_2 - z_1) = 0 \quad (25)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 - k_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - c_2(z_2 - z_1) - k_1(\dot{z}_1 - \dot{h}) = c_1(h - z_1).$$



Tlumící síla pneumatiky může být zanedbána, protože tlumící účinek pneumatiky je nepatrný a soustava je tlumena silou F_{k2} .

Rovnice (25) tedy představují hledané vztahy, které jsou použity při simulaci.

Ke stejnému výsledku je možné dospět také při použití Lagrangeovy rovnice II. druhu:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{z}_j} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial z_j} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{z}_j} + \frac{\partial E_P}{\partial z_j} = Q_j(t), \quad (26)$$

kde E_K představuje kinetickou energii, E_D disipativní energii, E_P potenciální energii a Q vyjadřuje silové buzení soustavy.

Pro čtvrtinový model automobilu, tj. kmitavou soustavu se dvěma stupni volnosti, jsou jednotlivé druhy energií vyjádřeny ve tvaru:

$$E_K = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n m_j \dot{z}_j^2 = \frac{1}{2} (m_1 \dot{z}_1^2 + m_2 \dot{z}_2^2), \quad (27)$$

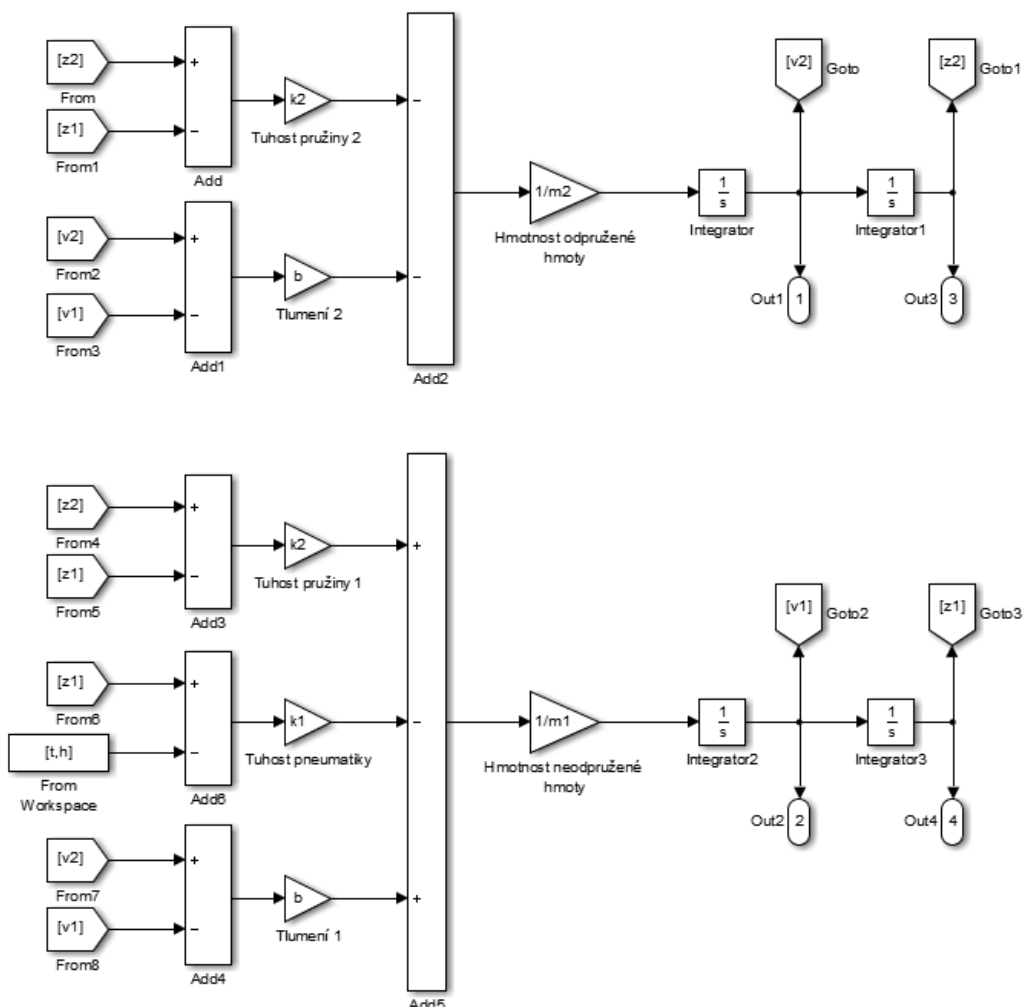
$$E_D = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n k_j (\dot{z}_j - \dot{z}_{j-1})^2 = \frac{1}{2} [k_1 (\dot{z}_1 - \dot{h})^2 + k_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1)^2], \quad (28)$$

$$E_P = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n c_j (z_j - z_{j-1})^2 = \frac{1}{2} [c_1 (z_1 - h)^2 + c_2 (z_2 - z_1)^2]. \quad (29)$$

Derivací vztahů (27) až (29) a jejich následným dosazením do rovnice (26) přejde tato rovnice na tvar (25).

MATEMATICKÝ MODEL V PROSTŘEDÍ SIMULINK

Po odvození pohybových rovnic matematického modelu jsou tyto vztahy převedeny do prostředí Matlab/Simulink.



Obr. 44 Čtvrtinový model automobilu – model v prostředí Simulink

MECHANICKÉ VLASTNOSTI MODELU

Vlastnosti matematického modelu pro výpočet IRI jsou definovány následovně [4]:

$$\frac{c_2}{m_2} = 63,3 \quad \frac{c_1}{m_2} = 653 \quad \frac{k_2}{m_2} = 6 \quad \frac{m_1}{m_2} = 0,15 .$$

Výsledek simulace nezávisí na absolutních hodnotách jednotlivých veličin, ale pouze na jejich vzájemném poměru.

7.4.2 VÝPOČET

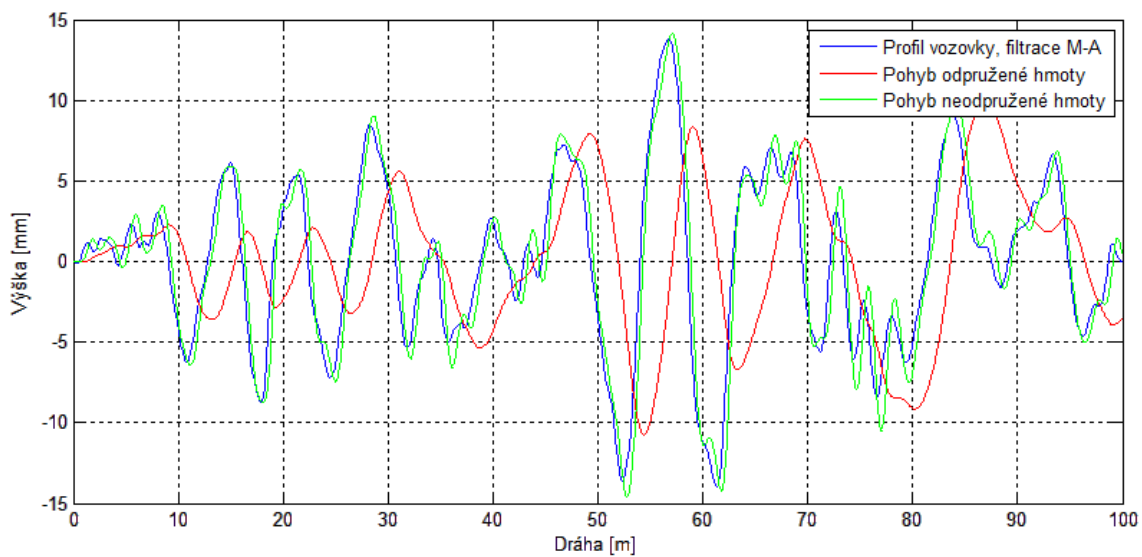
Skript vytvořený v programu Matlab nejprve načte textový soubor s daty, která představují průběh nerovností povrchu vozovky. Tyto data byla získaná experimentálním měřením provedeným v rámci této diplomové práce. Před samotnou simulací za použití čtvrtinového modelu automobilu je profil při výpočtu IRI standardně filtrován pomocí funkce klouzávy průměr s délkou intervalu B 250 milimetrů. Jakmile jsou data zfiltrována, skript zavolá



čtvrtinový model automobilu vytvořený v prostředí Simulink. Výstupem simulace jsou průběhy rychlostí odpružené a neodpružené hmoty. Tyto pak opět zpracovává původní skript, který na jejich základě určí výslednou hodnotu IRI pro daný úsek silnice. Vztah pro výpočet IRI použitý ve skriptu je odvozen z rovnice (13):

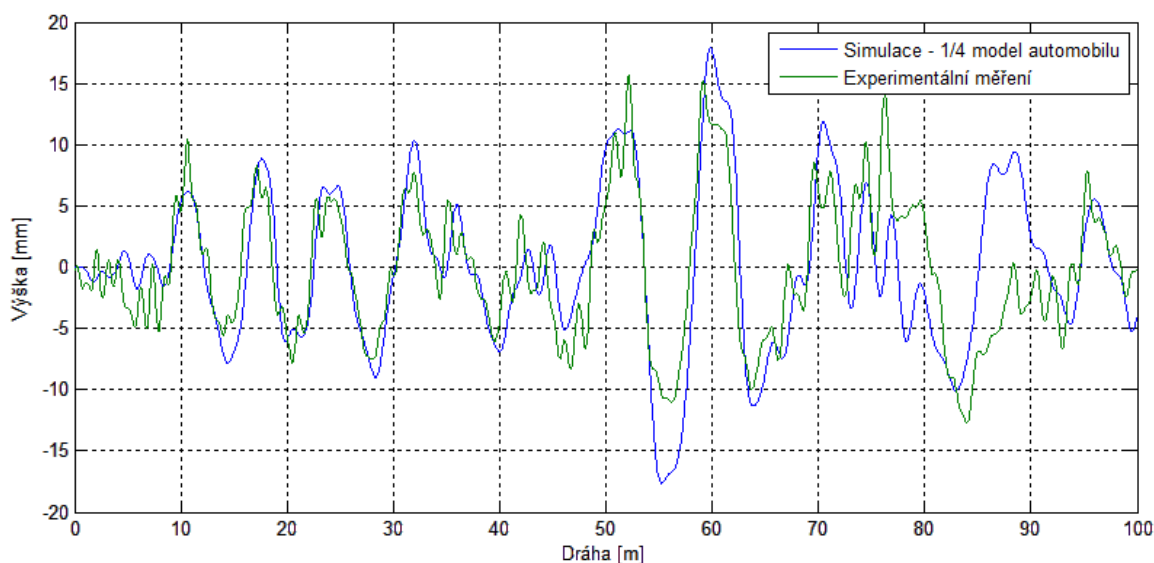
$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^T |\dot{z}_2 - \dot{z}_1| dt \sim \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{T/\Delta t} |\dot{z}_{2,i} - \dot{z}_{1,i}| \Delta t. \quad (30)$$

Ukázka pohybu odpružené a neodpružené hmoty vypočítaného za pomoci matematického modelu v Simulinku je znázorněn na následujícím obrázku.

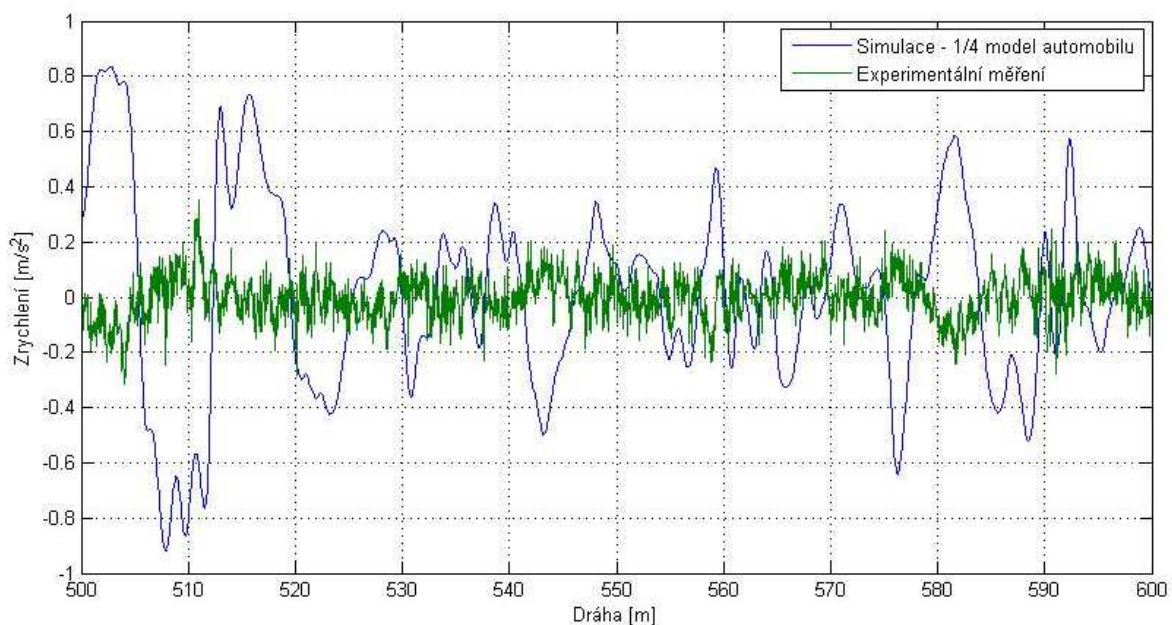


Obr. 45 Výstup simulace modelu v softwaru Matlab/Simulink

Následující obrázek porovnává relativní pohyb odpružených a neodpružených hmot vypočítaný pomocí čtvrtinového modelu automobilu v Simulinku s daty získanými experimentálním měřením při jízdě po daném úseku vozovky. Průměrná rychlost jízdy při měření zobrazeného úseku byla $76 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, matematický model simuloval rychlost $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.



Obr. 46 Relativní pohyb odpružené a neodpružené hmoty – porovnání simulace a experimentálního měření



Obr. 47 Zrychlení odpružené hmoty - porovnání simulace a experimentálního měření (průběhy mají opačná znaménka)

Porovnáním naměřených dat se simulací lze v obou případech pozorovat odchylky, které jsou způsobeny především rozdílnými parametry skutečného vozidla a matematického modelu, který je nastaven pro výpočet IRI.



7.5 VÝPOČET RN

Pro výpočet parametru drsnosti vozovky RN je zapotřebí nejprve určit index PI. Postup pro výpočet PI je velmi podobný výpočtu IRI. Profil je filtrován funkcí klouzavý průměr s periodou 250 milimetrů a data jsou zpracovány pomocí čtvrtinového modelu automobilu. Na rozdíl od IRI je PI vyjádřen v jednotkách m/m a vlastnosti modelu jsou [4]:

$$\frac{c_2}{m_2} = 390 \quad \frac{c_1}{m_2} = 5120 \quad \frac{k_2}{m_2} = 17 \quad \frac{m_1}{m_2} = 0,036 .$$

Následně je proveden přepočítání PI na RN pomocí vztahu (14).

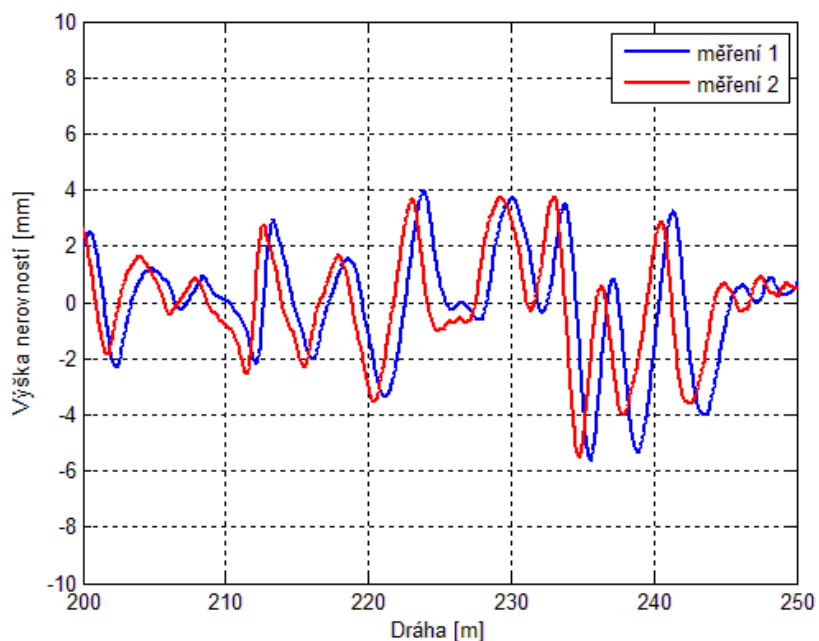
Výsledná hodnota RN se nachází v intervalu od 0 do 5, kde hodnota 5 představuje dokonalý povrch silnice bez nerovností.



8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

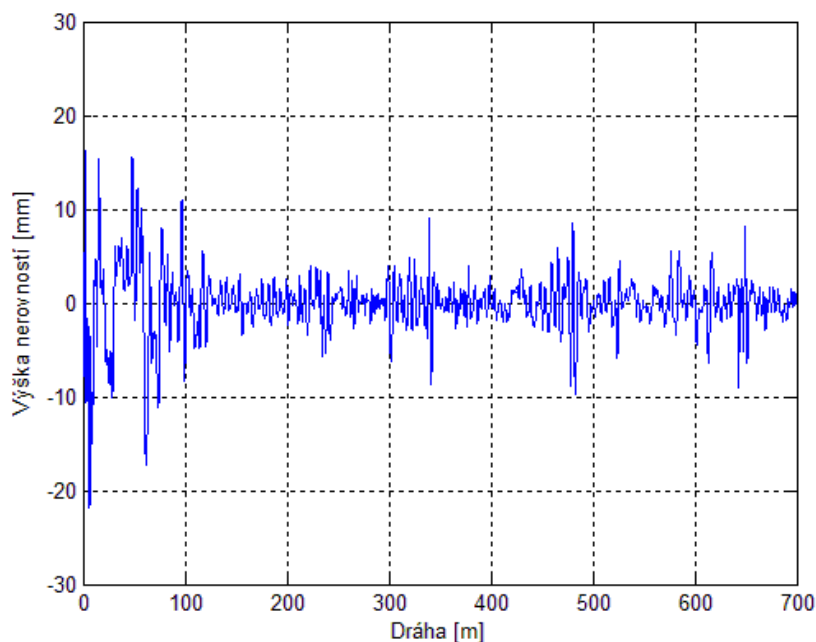
Tato kapitola se zabývá zpracováním a vyhodnocením dat získaných experimentálním měřením provedeným v rámci této diplomové práce. Data jsou analyzována z několika hledisek: hodnocení přesnosti a opakovatelnosti měření, posouzení vlivu rychlosti měřicího vozidla na vypočítaný profil a také analýza jednotlivých naměřených úseků, která je součástí přílohy. Na následujícím grafu je ukázka průběhu dvou profilů měřených na stejném úseku. Průběhy jsou vůči sobě posunuty, nicméně jejich průběhy jsou si velice podobné a výška nerovností se jen místy liší o více než 1 milimetr. Pro posouzení přesnosti měření je však výhodné porovnání na základě nějakého číselného indexu. Pro tento účel byl vybrán široce používaný index drsnosti vozovky IRI.

Protože hodnota IRI se může na měřeném úseku výrazně měnit, jak bude nicméně k vidění dále, je výhodné měřený úsek rozdělit na několik menších částí a pro každou tuto část vypočítat hodnotu IRI zvlášť. Délka těchto krátkých úseků by neměla být menší než 30 metrů, neboť to je maximální délka nerovností, které se ještě projevují z hlediska jízdního komfortu a ovlivňují výslednou hodnotu IRI. Při vyhodnocování dat v této diplomové práci byly záznamy jednotlivých lokalit rozděleny na kratší části o délce 50 metrů.



Obr. 48 Porovnání dvou profilů získaných na stejném úseku vozovky

Vypočítaný profil se na počátku dráhy vyznačuje velmi velkými nerovnostmi. Tato vlastnost se projevuje několik desítek metrů od počátku měření a je pravděpodobně způsobena zrychlením vozidla při rozjíždění se na měřicí rychlost. Dalším vlivem, který se zde může projevovat, jsou omezené možnosti matematické filtrace na počátku dráhy, kde není dostatečný počet bodů pro výpočet. To by se ale projevilo se stejným efektem i na konci měřeného úseku, což se ovšem neděje. V důsledku tohoto jevu je prvních 100 metrů úseku při analýze profilu vozovky zanedbáno a vyhodnocována je až ta část profilu, která se nachází za tímto počátečním úsekem.

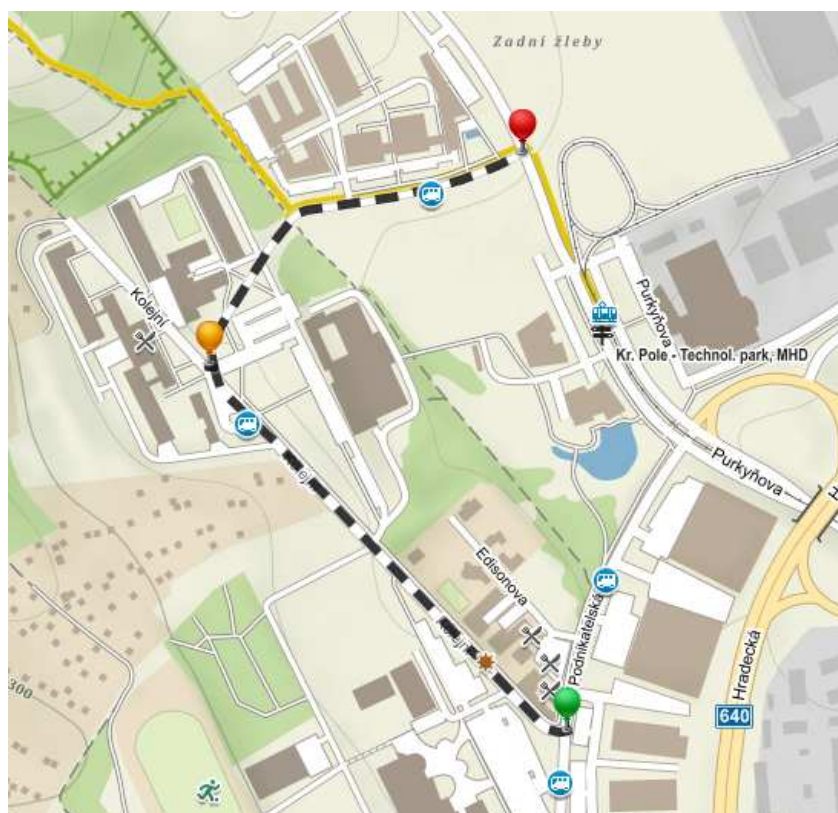


Obr. 49 Výrazné nerovnosti na počátku profilu vozovky

8.1 PŘESNOST MĚŘENÍ

Za účelem ověření přesnosti měření profilu vozovky navrhovanou metodikou byla provedena řada opakovaných měření na jednom úseku. Lokalita měření se nacházela na ulici Kolejní v Brně v městské části Královo Pole. Jako měřítko pro ověření přesnosti měření je zde použit parametr drsnosti vozovky IRI.

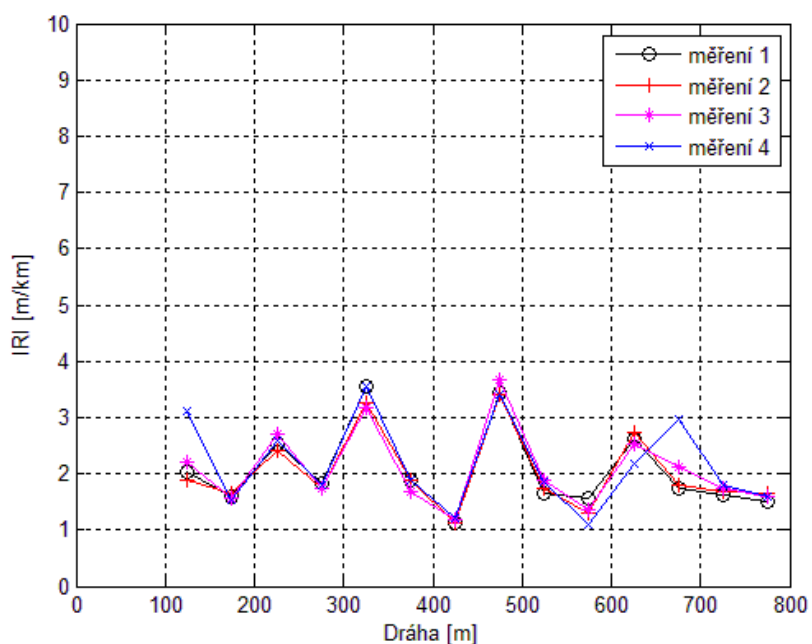
Začátek měřeného úseku se nachází na křižovatce ulice Kolejní a Podnikatelská, konec úseku je lokalizován na křižovatce asi 100 metrů za autobusovou zastávkou Vědeckotechnologický park, východním směrem. Měření bylo provedeno celkem osmkrát. Čtyřikrát v jednom směru a čtyřikrát ve směru opačném, přičemž oba směry jsou vyhodnocovány jako dva různé úseky. Průměrná rychlost při měření byla 40 km/h.



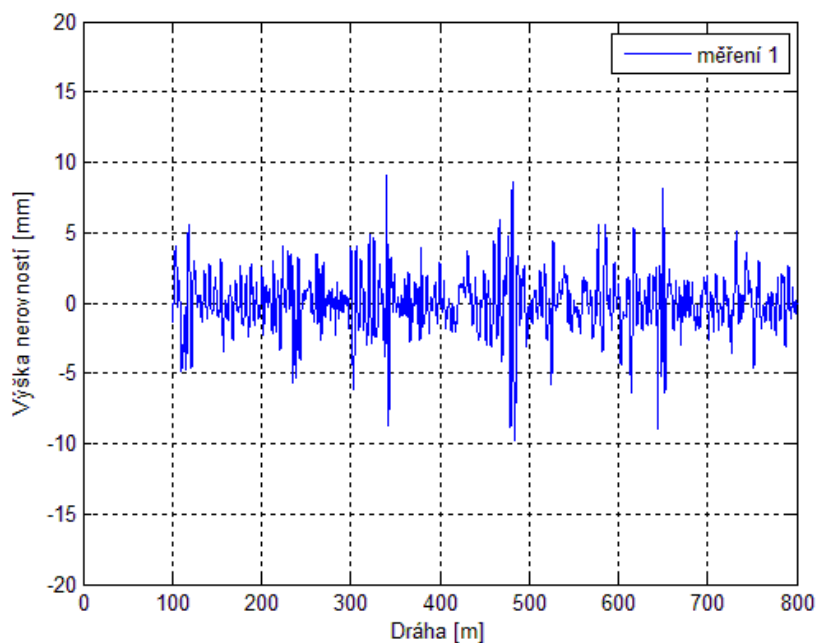
Obr. 50 Mapa úseku pro ověření přesnosti navrhované metodiky [20]

ÚSEK 1 - START NA KŘIŽOVATCE ULIC KOLEJNÍ A PODNIKATELSKÁ

Vypočítané hodnoty IRI pro jednotlivé 50 metrové úseky jsou znázorněny na následujícím obrázku. Číselné hodnoty vypočítané z dat získaných jednotlivými měřeními si ve většině případů odpovídají. Nicméně, nacházejí se zde dva úseky, kde se hodnoty IRI získané z dat jednoho měření výrazně odlišují od ostatních měření. Jedná se o úseky 100 až 150 metrů a 650 až 700 metrů.



Obr. 51 Hodnoty IRI na úseku 1 – start z ulice Podnikatelská



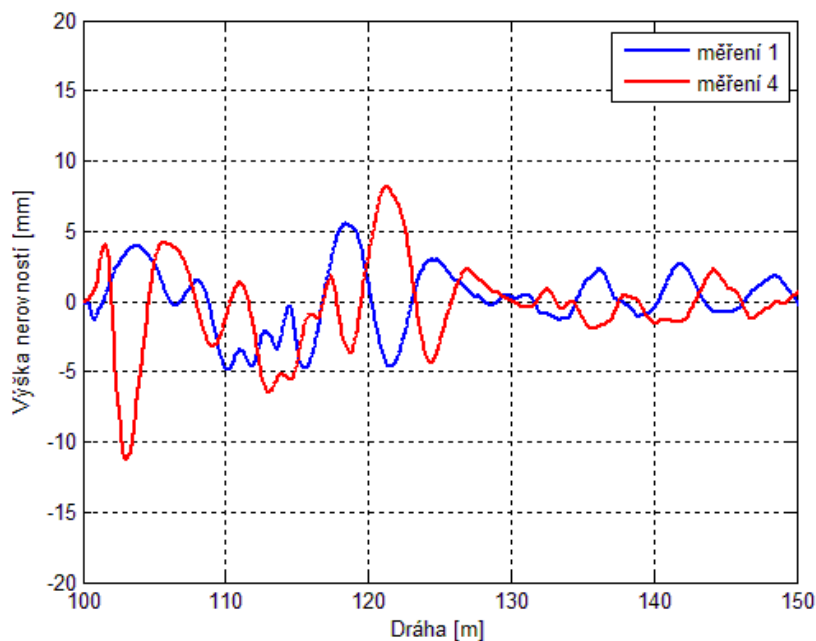
Obr. 52 Vypočítaný profil vozovky měřeného úseku – start z ulice Podnikatelská

Úsek 100 až 150 metrů

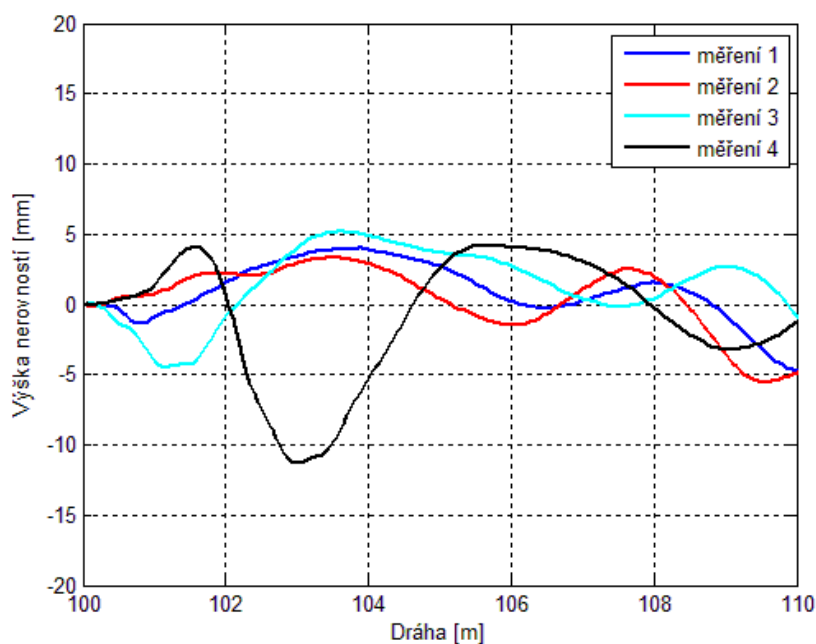
Hodnoty IRI vypočítané z dat získaných během měření č. 1 až 3 se pohybují okolo 2 m/km. Při měření č. 4 však dosahuje hodnoty přes 3 m/km. Pro vysvětlení této odchylky je potřeba vzájemně porovnat získané profily vozovky. Při grafickém zobrazení lze pozorovat, že profil



vozovky z měření č. 4 je vůči profilu z měření č. 1 posunut přibližně o 3 metry doprava. Tato skutečnost sama o sobě nevede a neměla by mít za následek tak velký rozdíl ve výsledné hodnotě indexu drsnosti vozovky. Ten je způsoben výraznou nerovností ve vzdálenosti 103 metrů od počátku měření č. 4, která se v ostatních měřeních nevyskytuje z důvodu vzájemného posunutí profilů.



Obr. 53 Porovnání vypočítaného profilu z měření č. 1 a 4



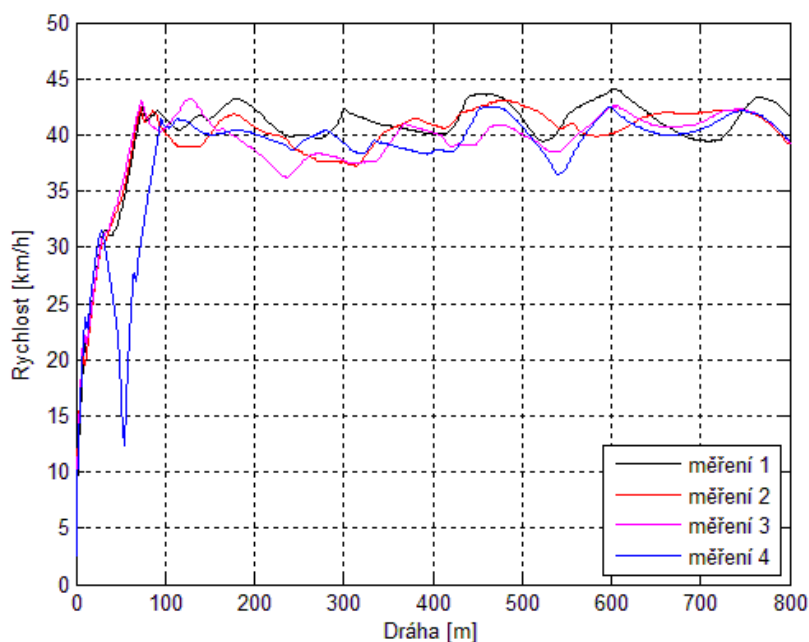
Obr. 54 Porovnání jednotlivých profilů – detail oblasti s výraznou nerovností v měření č. 4



Na předchozím obrázku lze pozorovat, že amplituda nerovnosti profilu vypočítaného z dat měření č. 4 ve vzdálenosti 103 metrů od počátku je několikanásobně větší než u odpovídajících nerovnosti u ostatních profilů. To mohlo být způsobeno detekcí trhliny, která nebyla při ostatních měřeních zaznamenána, nebo se jí měřící vozidlo vyhnulo.

Další možné vysvětlení přináší zobrazení průběhu rychlostí během jednotlivých měření. Zjistíme, že při měření č. 4 vozidlo ve vzdálenosti 50 metrů od počátku měření prudce zpomalilo a jeho rychlost dosáhla měřicí rychlosti 40 km/h až po ujetí dalších 50 metrů dráhy. Zrychlení vozidla mohlo mít vliv na výslednou amplitudu nerovností a údaje ze senzoru zrychlení zřejmě nestačí ke kompenzaci tohoto jevu. Průběh rychlosti se samozřejmě mění i v průběhu měření, nicméně z průběhu rychlostí v grafu lze pozorovat, že zrychlení měřícího vozidla není nikde tak vysoké jako v počátečním úseku měření č. 4.

Vzhledem ke skutečnosti, že vypočítaná hodnota IRI mohla být v tomto úseku ovlivněna změnou rychlosti jízdy, bude při statistickém zpracování dat nahrazena aritmetickým průměrem hodnot vypočítaných z dat ostatních měření.



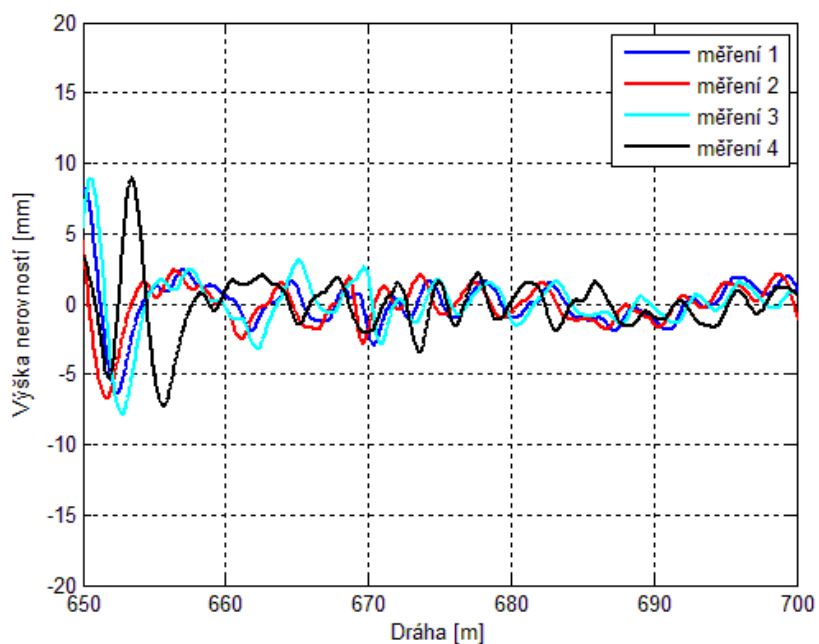
Obr. 55 Průběh rychlosti měřícího vozidla během měření

Úsek 650 až 700 metrů

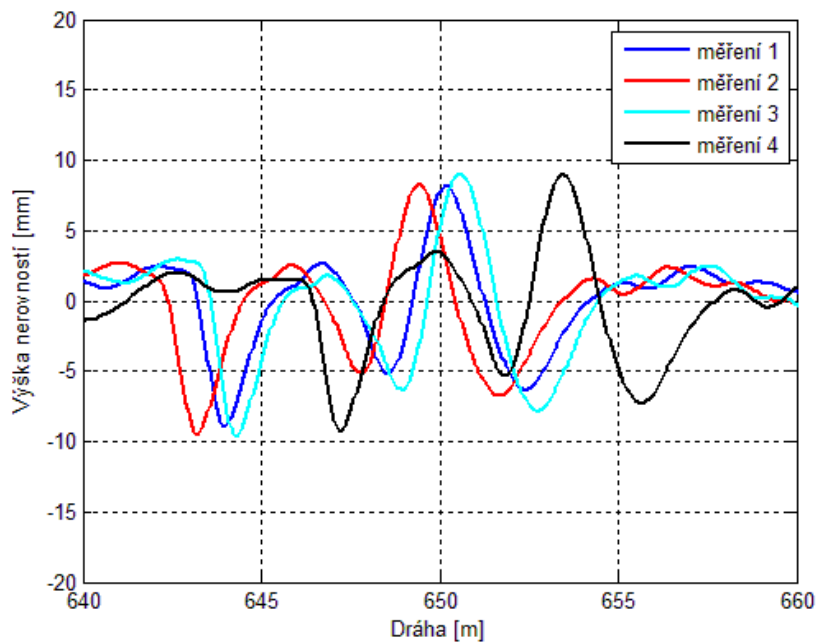
Na tomto úseku se opět hodnota IRI vypočítaná z dat měření č. 4 výrazně liší od ostatních hodnot. Při bližším pohledu na průběh jednotlivých profilů ze všech měření lze pozorovat, že v tomto případě je rozdíl způsoben posunutím profilu přibližně o 3 metry vůči ostatním. Nerovnost o velké amplitudě ve vzdálenosti 650 metrů se v prvních třech měřeních nachází přímo na hranici jednotlivých 50 metrových úseků, takže část této nerovnosti se projeví na hodnotě IRI v úseku 600 až 650 metrů a část se projeví v úseku 650 až 700 metrů. Při měření č. 4 se nerovnost nachází celá v úseku 650 až 700 metrů, proto se zde hodnota IRI tak výrazně



odlišuje. Hodnota IRI ale není chybná, proto nebude při statistickém zpracování dat nahrazena.



Obr. 56 Zobrazení vypočítaných profilů vozovky v úseku 650 až 700 m

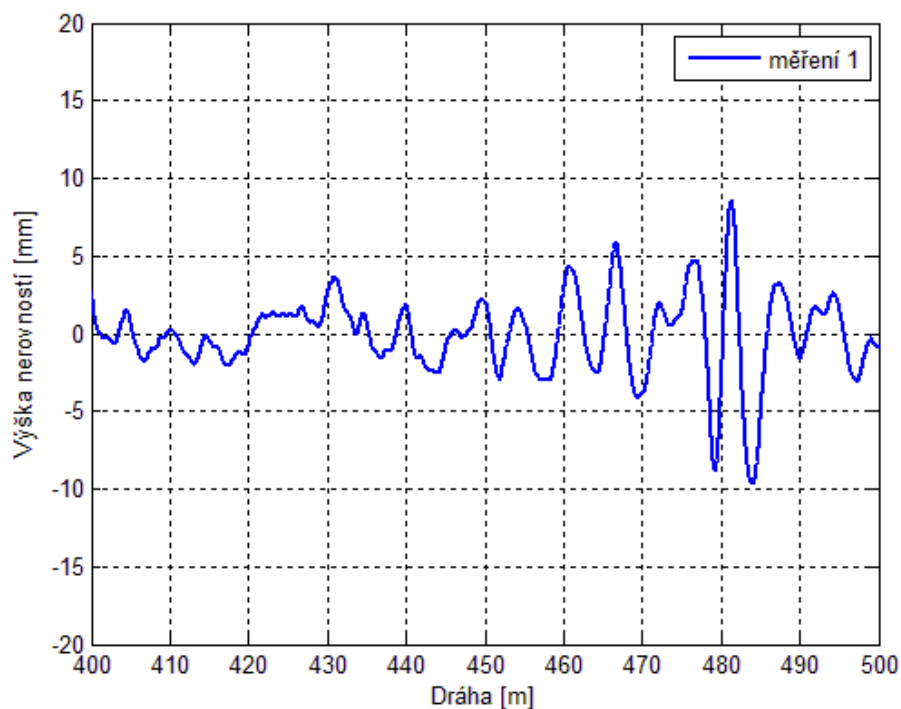


Obr. 57 Detail vypočítaných profilů na hranici úseků 600 až 650 m a 650 až 700 m



Úsek 400 až 500 metrů

V tomto úseku se vypočítané hodnoty IRI shodují bez výraznějšího rozdílu, nicméně jednotlivé sousední úseky 400 až 450 metrů a 450 až 500 metrů se vyznačují velmi velkým rozdílem ve vypočítaných hodnotách indexů drsnosti. Z tohoto důvodu je vhodné se profilu na zmíněném úseku věnovat podrobněji.



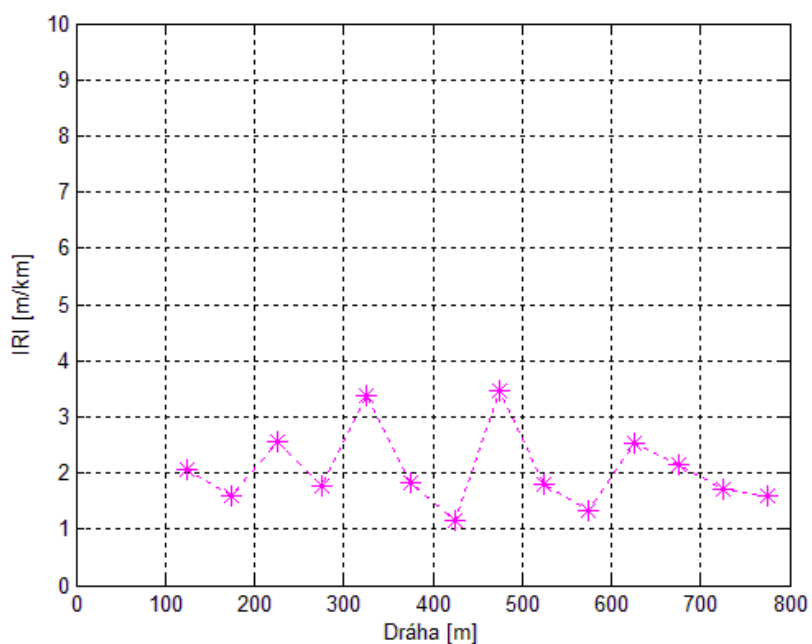
Obr. 58 Vypočítaný profil vozovky v úseku 400 až 450 m

Na obrázku průběhu profilu lze pozorovat, odlišný charakter nerovností obou úseků. První úsek, 400 až 450 metrů, je charakteristický převážně malými nerovnostmi s menší vlnovou délkou, zatímco v úseku 450 až 500 metrů amplituda nerovností několikanásobně narůstá, stejně tak jako jejich vlnová délka.



Tab. 3 Průměrné hodnoty IRI a průměrná odchylka na úseku 1

Úsek [m]	IRI [m/km]	Δ [m/km]
100 - 150	2,07	0,11
150 - 200	1,58	0,04
200 - 250	2,56	0,09
250 - 300	1,77	0,03
300 - 350	3,38	0,16
350 - 400	1,84	0,08
400 - 450	1,16	0,02
450 - 500	3,48	0,09
500 - 550	1,79	0,09
550 - 600	1,34	0,13
600 - 650	2,52	0,18
650 - 700	2,16	0,41
700 - 750	1,71	0,06
750 - 800	1,58	0,04
Průměr	2,07	0,11

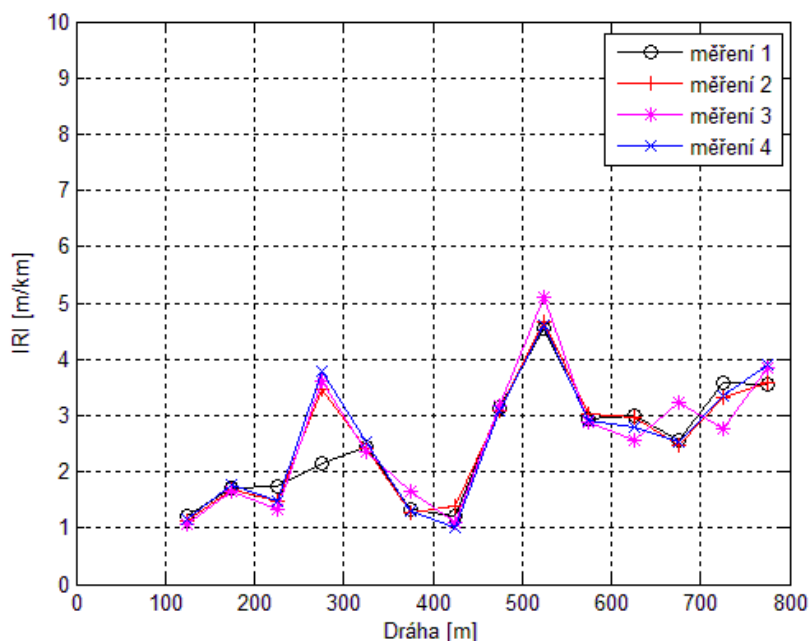


Obr. 59 Průměrné hodnoty IRI na úseku 1

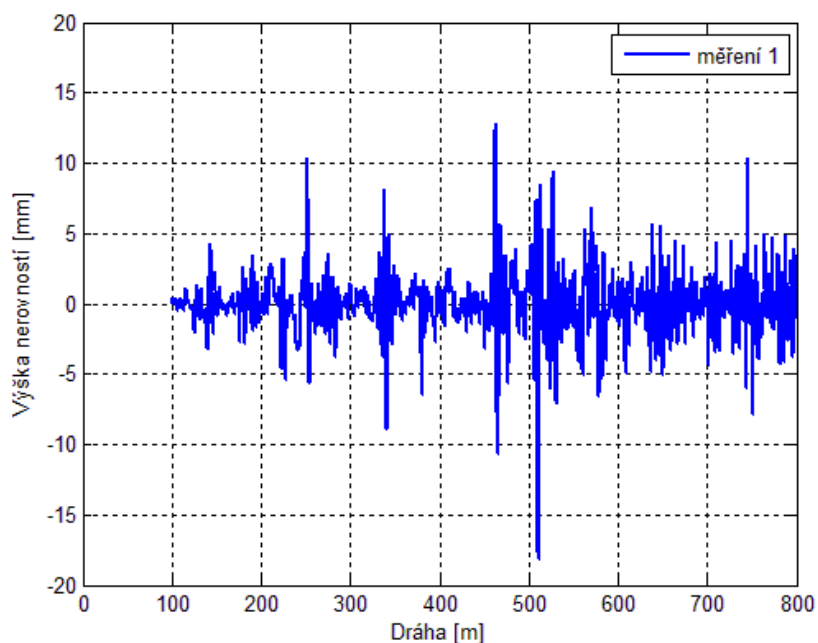


ÚSEK 2 – START U AUTOBUSOVÉ ZASTÁVKY VĚDECKOTECHNOLOGICKÝ PARK

Hodnoty IRI získané měřením tohoto úseku si místy odpovídají s vysokou přesností, ale rozdíly na některých úsecích jsou zde výraznější než na při měření na úseku č. 1. Výrazný rozdíl se objevuje v úseku 250 až 300 metrů, kde se odlišuje hodnota indexu drsnosti vozovky vypočítaná z dat měření č. 1. V úseku 600 až 800 metrů je rozptyl hodnot výraznější než ve zbytku celkového úseku a pozornost je třeba věnovat také úseku 500 až 550 metrů, kde je hodnota IRI výrazně vyšší než v ostatních úsecích.



Obr. 60 Hodnoty IRI na měřeném úseku – start od zastávky Vědeckotechnologický park

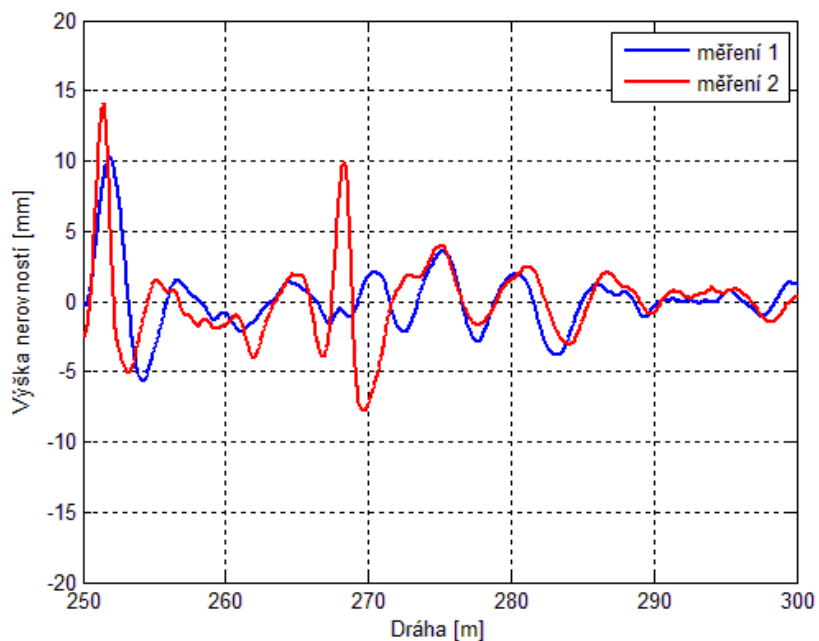


Obr. 61 Vypočítaný profil vozovky měřeného úseku – start od zastávky Vědeckotechnologický park



Úsek 250 až 300 metrů

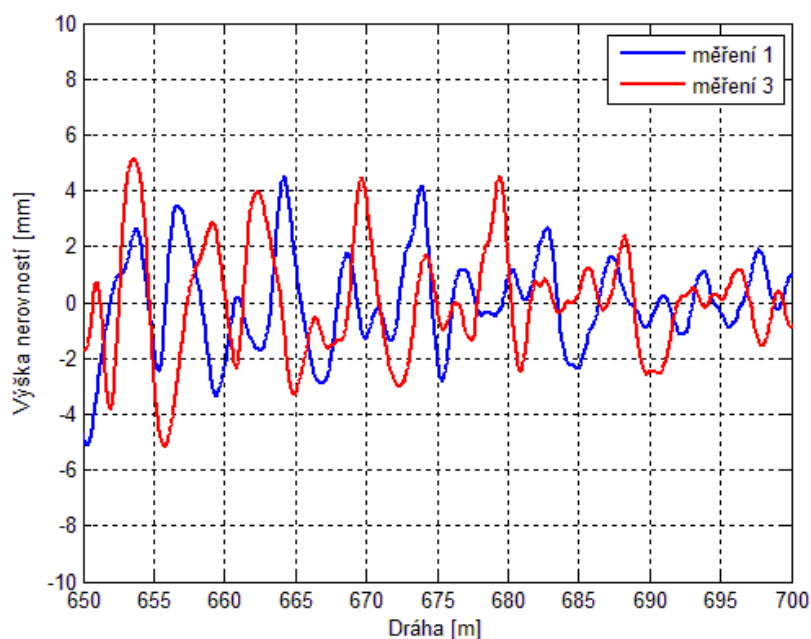
Z porovnání průběhů profilu tohoto úseku je zřejmé, že při měření č. 1 nebyla zaznamenána výrazná nerovnost ve vzdálenosti kolem 270 metrů od počátku měření. Toto mohlo být způsobeno měřením profilu vozovky v jiné stopě nebo laserový snímač vzdálenosti nestihl v tomto měření nerovnost zaznamenat.



Obr. 62 Porovnání vypočítaného profilu z měření č. 1 a 2

Úsek 600 až 800 metrů

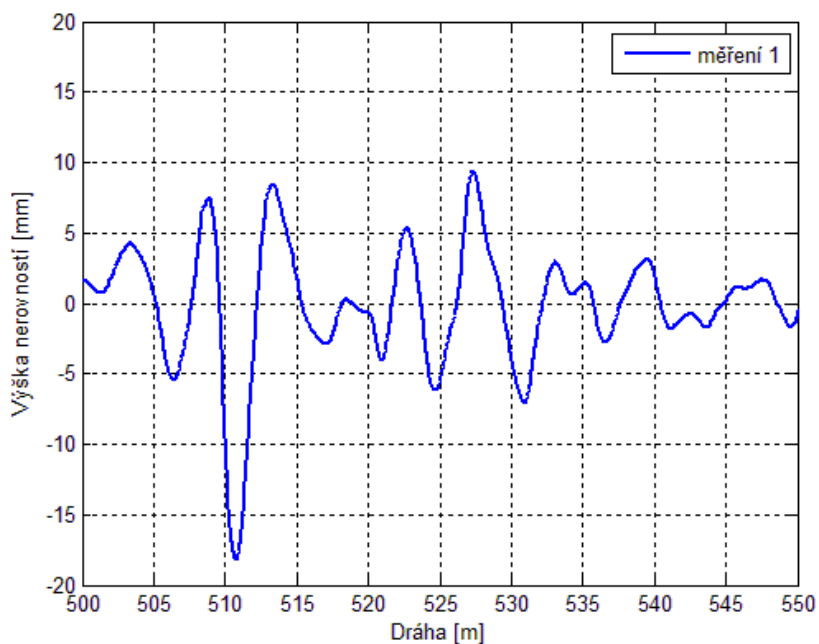
Rozdíl v hodnotách IRI získaných z dat měření č. 3 vůči ostatním úsekům je způsoben posunutím průběhu profilu o vzdálenost 5 metrů. Vzhledem k větším amplitudám nerovností v tomto úseku se zde tento efekt projevuje ve větší míře než na jiných místech.



Obr. 63 Porovnání vypočítaného profilu z měření č. 1 a 3

Úsek 500 až 550 metrů

Při detailním pohledu na průběh profilu vozovky v tomto úseku lze vyzorovat, že výrazný nárůst v hodnotě IRI je způsoben nerovnostmi s vyšší amplitudou, především pak nerovností nacházející se ve vzdálenosti asi 511 metrů od počátku měření. S největší pravděpodobností se jedná o díru na povrchu vozovky.

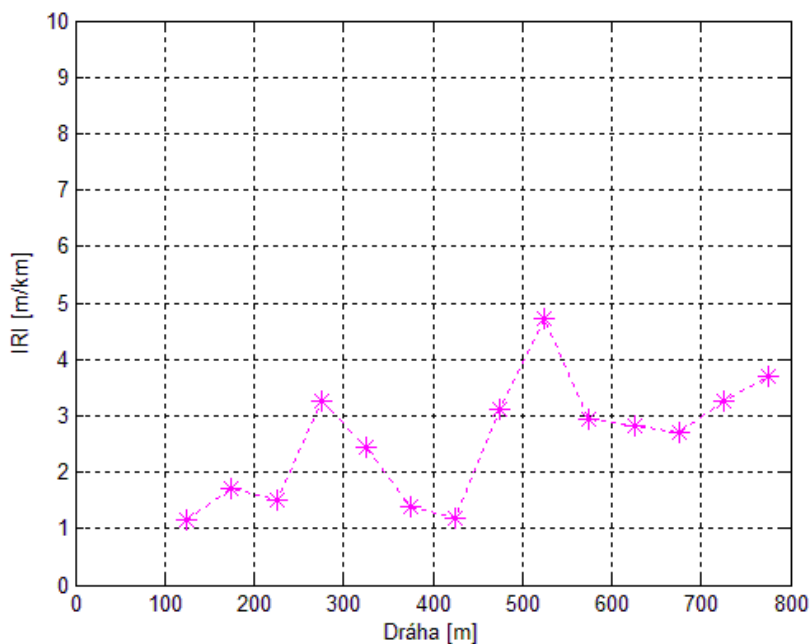


Obr. 64 Profil vozovky v úseku 500 až 550 m



Tab. 4 Průměrné hodnoty IRI a průměrná odchylka na úseku 2

Úsek [m]	IRI [m/km]	Δ [m/km]
100 - 150	1,14	0,04
150 - 200	1,71	0,04
200 - 250	1,51	0,12
250 - 300	3,25	0,56
300 - 350	2,43	0,05
350 - 400	1,39	0,13
400 - 450	1,19	0,12
450 - 500	3,12	0,04
500 - 550	4,72	0,19
550 - 600	2,94	0,04
600 - 650	2,83	0,16
650 - 700	2,70	0,27
700 - 750	3,26	0,24
750 - 800	3,71	0,16
Průměr	2,56	0,15



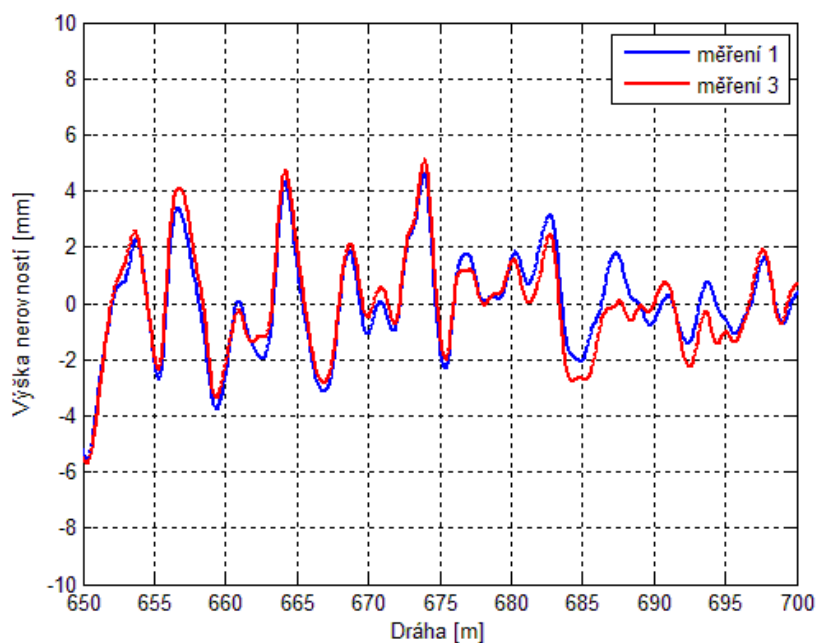
Obr. 65 Průměrné hodnoty IRI na úseku 2



VYHODNOCENÍ

Průměrná odchylka vypočítaných hodnot IRI je po zaokrouhlení $\pm 0,1$ m/km u prvního úseku a $\pm 0,2$ m/km u druhého úseku. Relativní odchylka je tedy menší než 6 %. Chyba měření je ve skutečnosti menší, neboť jednotlivé profily jsou vůči sobě v některých případech posunuty až o vzdálenost 5 metrů. Měřený úsek také nebyl úplně rovný a v zatáčkách je udržení jedné měřicí stopy obtížnější než na rovném úseku. Tato skutečnost významně komplikuje vyhodnocování přesnosti měřicího systému.

Na obrázku č. 63 jsou zobrazeny průběhy dvou vypočítaných profilů vozovky naměřených na úseku 2, konkrétně se jedná o profily získané měřeními č. 1 a 3. Tyto profily jsou vůči sobě posunuty o vzdálenost přibližně 5,5 metru. Původní hodnoty IRI na zobrazeném úseku jsou: 2,56 m/km (měření 1) a 3,24 m/km (měření 3). Pokud jsou oba profily synchronizovány, tj. profil získaný měřeními č. 3 je posunut o 5,5 metru směrem k počátku měření, hodnota IRI nabývá hodnoty 2,55 m/km. V prvním případě rozdíl v IRI činí 0,68 m/km, ve druhém případě se tento rozdíl snižuje na 0,01 m/km. Uvažované synchronizované profily zobrazuje následující obrázek.



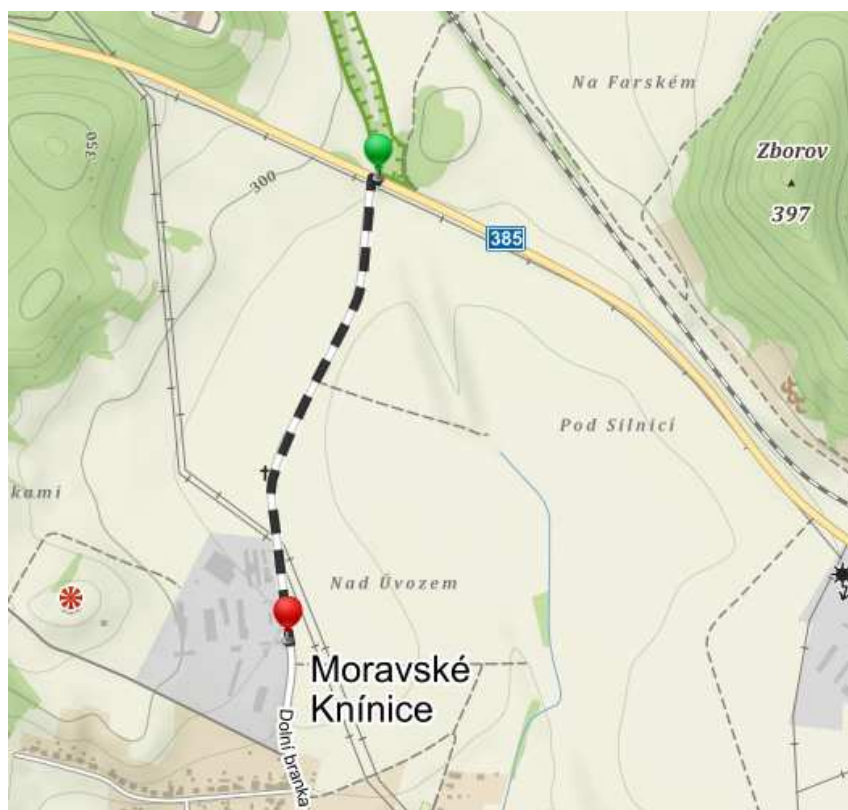
Obr. 66 Synchronizované profily dvou různých měření stejného úseku

Z výše uvedeného vyplývá, že na vzájemnou porovnatelnost jednotlivých měření uskutečněných na stejném úseku silnice má nejvýznamnější vliv udržování jedné měřicí stopy a správná synchronizace profilů, tj. stejný počátek měření. Dodatečná synchronizace profilů prováděná až při samotném zpracování dat může být časově náročná, proto je vhodné tento nežádoucí efekt co nejvíce potlačit již v průběhu vlastního měření.



8.2 VLIV RYCHLOSTI

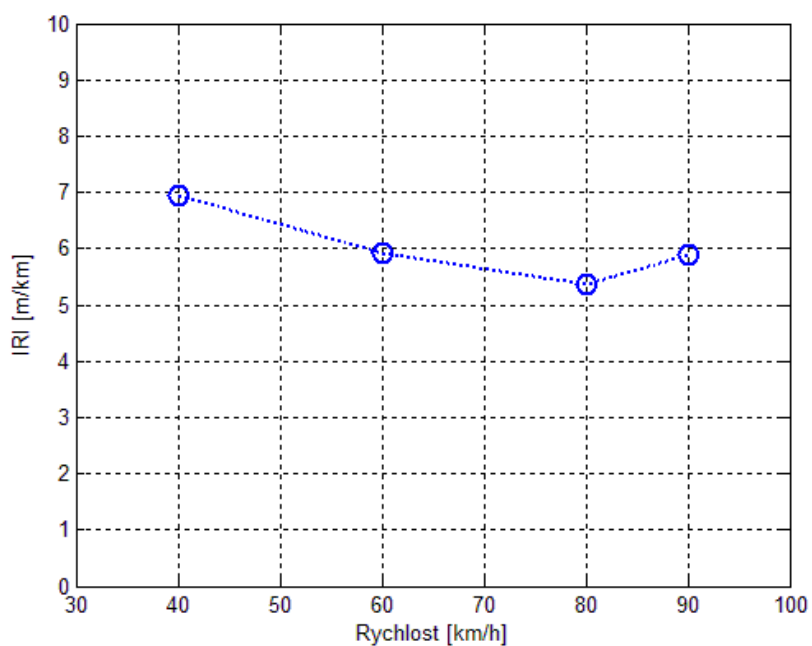
Pro analýzu vlivu rychlosti měřícího vozidla na výsledný tvar profilu vozovky byla provedena sada měření na silnici spojující obec Moravské Knínice se silnicí č. 385. Měření byla provedena při rychlostech 40, 60, 80 a 90 km/h. Pro každou rychlost bylo měření provedeno jednou v jednom směru a podruhé ve směru opačném, celkem tedy 8 měření.



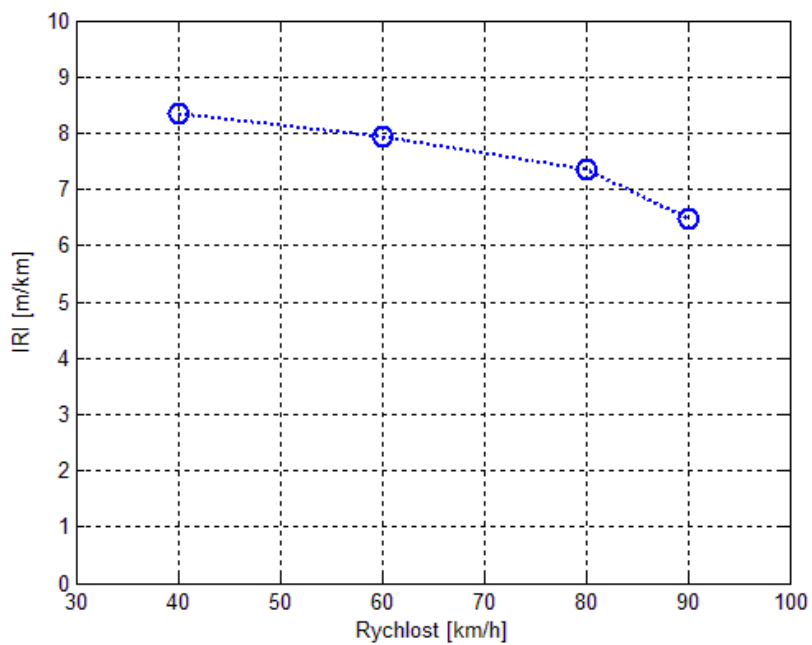
Obr. 67 Mapa úseku pro vyhodnocení vlivu rychlosti měřícího vozidla [20]

Analýza vlivu rychlosti na výsledný tvar měřeného profilu vozovky se poněkud liší od předchozí analýzy přesnosti. Pro porovnání není celkový úsek rozdělen na kratší 50 metrové části, ale je analyzován jako celek. Důvodem jsou především podmínky a způsob provedení samotného experimentálního měření na daném místě. Protože pro dosažení vyšší rychlosti je zapotřebí delší dráha, byl start pro měření při vyšších rychlostech posunut o několik desítek metrů dál. Při vyšších rychlostech je rovněž velice obtížné udržovat stejnou měřící stopu jako v předchozím případě. Dalším faktorem, který mohl ovlivnit porovnatelnost dat získaných jednotlivými měřeními, je skutečnost, že měřený úsek zahrnoval dvě zatáčky. Tyto zatáčky nebyly prudké, nicméně při průjezdu vyšší rychlostí mohla odstředivá síla ovlivnit výsledná data.

V důsledku delší dráhy nutné pro dosažení měřící rychlosti začíná analýza profilu vozovky až ve vzdálenosti 500 metrů od začátku měření (rozjezdu). Délka vyhodnocovaného úseku je rovněž 500 metrů.



Obr. 68 Hodnoty IRI v závislosti na rychlosti měřícího vozidla – start od silnice 385



Obr. 69 Hodnoty IRI v závislosti na rychlosti měřícího vozidla – start od obce Moravské Knínice



Tab. 5 Hodnoty IRI v závislosti na rychlosti

Rychlost [km/h]	Úsek 1 IRI [m/km]	Úsek 2 IRI [m/km]
40	6,95	8,36
60	5,92	7,95
80	5,38	7,35
90	5,88	6,49

VYHODNOCENÍ

Při pohledu na grafické znázornění vypočítaných hodnot IRI v závislosti na rychlosti měřícího vozidla lze pozorovat mírný pokles drsnosti se vzrůstající rychlostí měření. Vzhledem k omezeným podmínkám experimentu a rozsahu naměřených dat je obtížné vyvozovat přesné závěry.

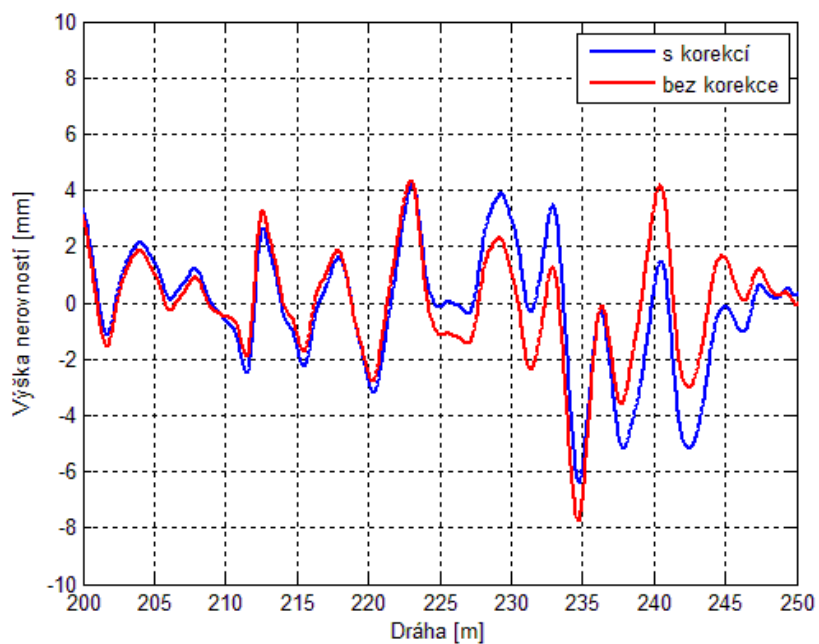
Daný úsek byl pro měření vlivu rychlosti na tvar výsledného profilu vybrán z následujících důvodů: jednalo se o poměrně dlouhý úsek bez výrazných zatáček a bez výrazného automobilového provozu. Problémem je zde technický stav vozovky, který je spíše horší kvality a jako takový vykazuje vyšší hodnoty IRI. Čím vyšší IRI, tím vyšší jsou vzájemné odchylky jednotlivých měření. Narůstají také rozdíly mezi jednotlivými stopami, ve kterých je měření prováděno. Pro přesnější vyhodnocení vlivu rychlosti měřícího vozidla na výsledný profil vozovky by bylo zapotřebí provést měření na dostatečně dlouhém a rovném úseku silnice, kde by měření při různých rychlostech neomezovalo silniční provoz a nedocházelo by k porušování pravidel silničního provozu. Jako ideální se jeví např. přistávací dráha pro letadla nebo závodní okruh pro automobilové závody.

8.3 VÝZNAM KOMPENZACE MĚŘENÍM ZRYCHLENÍ ODPRUŽENÝCH HMOT

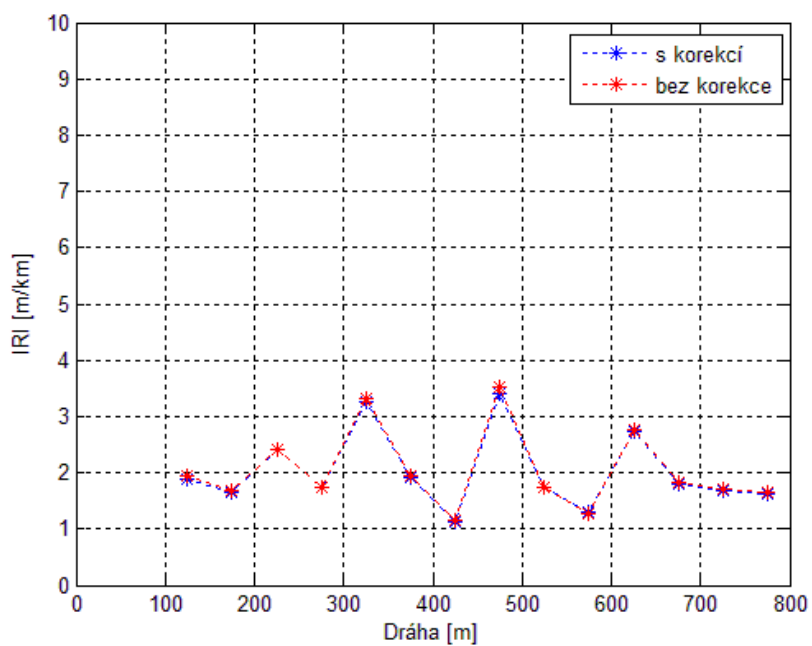
Navržený měřící systém využívá senzoru zrychlení pro kompenzaci výchyly referenční hladiny, která vzniká jako důsledek jízdy po nerovném povrchu vozovky. Pro vyhodnocení vlivu této korekce na výsledný tvar profilu jsou porovnány hodnoty IRI vypočítané z profilu s korekcí a profilu bez korekce. Pro analýzu jsou využity dva úseky různého typu. V prvním případě se jedná o novější silnici v dobrém technickém stavu, jako druhý případ byla zvolena starší poškozená cesta.

NOVÁ SILNICE

Z grafického zobrazení průběhu korigovaného a nekorigovaného profilu lze vidět, že vlnová délka nerovností i jejich amplituda si jsou velice podobné. Jednotlivé průběhy jsou vůči sobě v některých místech posunuty o vzdálenost několik milimetrů. Z porovnáním hodnot IRI vypočítaných pro korigovaný a nekorigovaný profil je zřejmé, že tento jev má na tento index drsnosti jen nepatrný vliv.



Obr. 70 Porovnání průběhu profilu s korekcí a bez korekce



Obr. 71 Hodnoty IRI profilu s korekcí a bez korekce



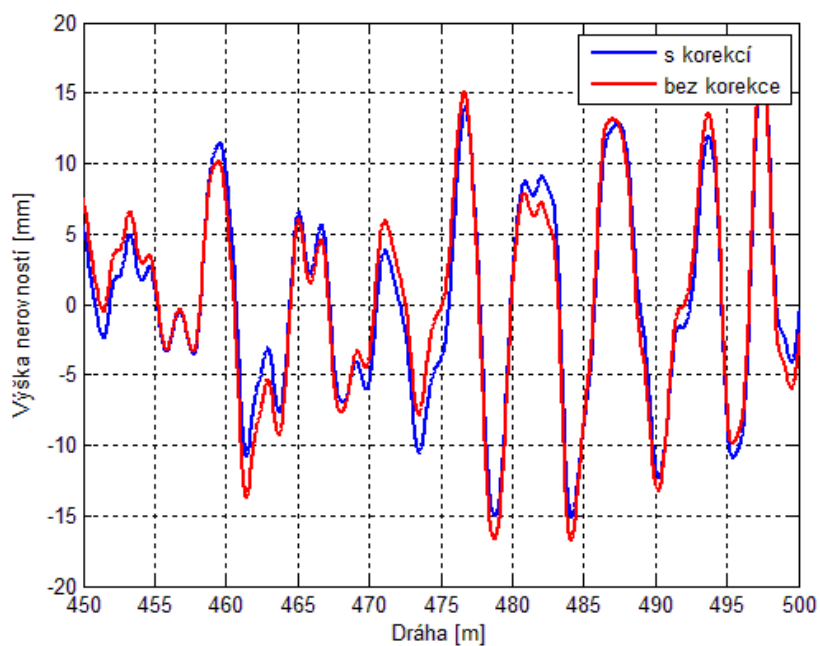
Tab. 6 Vypočítané hodnoty IRI a jejich odchylky pro daný úsek

Úsek [m]	IRI [m/km] s korekcí	IRI [m/km] bez korekce	Odchylka [m/km]
100 - 150	1,89	1,95	0,06
150 - 200	1,65	1,69	0,04
200 - 250	2,41	2,42	0,01
250 - 300	1,75	1,75	0,00
300 - 350	3,26	3,33	0,07
350 - 400	1,91	1,93	0,02
400 - 450	1,14	1,16	0,02
450 - 500	3,40	3,51	0,11
500 - 550	1,74	1,74	0,00
550 - 600	1,31	1,26	0,05
600 - 650	2,74	2,77	0,03
650 - 700	1,81	1,82	0,01
700 - 750	1,68	1,70	0,02
750 - 800	1,63	1,64	0,01

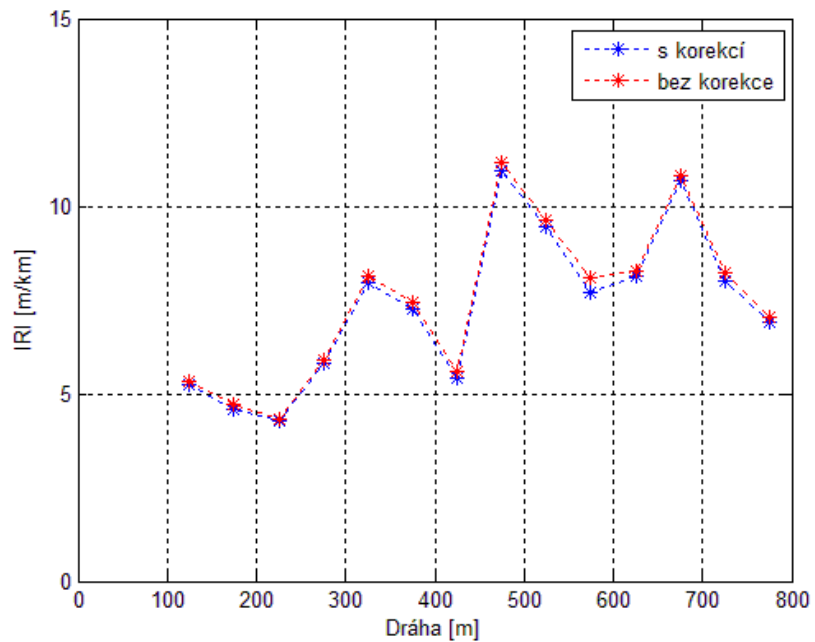
Podle výpočtu je průměrná odchylka profilu s korekcí a profilu bez korekce asi 0,03 m/km pro povrch vozovky v dobrém technickém stavu.

STARÁ SILNICE

U silnice v horším technickém stavu jsou rozdíly v amplitudách nerovností o něco vyšší než u nové vozovky. Ačkoliv je tento rozdíl vůči velikosti amplitud nerovností menší než v předchozím případě, vliv na výslednou hodnotu IRI je zde větší, ale i tak je malý.



Obr. 72 Porovnání průběhu profilu s korekcí a bez korekce



Obr. 73 Hodnoty IRI profilu s korekcí a bez korekce



Tab. 7 Vypočítané hodnoty IRI a jejich odchylky pro daný úsek

Úsek [m]	IRI [m/km] s korekcí	IRI [m/km] bez korekce	Odchylka [m/km]
100 - 150	5,23	5,34	0,11
150 - 200	4,58	4,70	0,12
200 - 250	4,26	4,34	0,08
250 - 300	5,81	5,90	0,09
300 - 350	7,98	8,14	0,16
350 - 400	7,27	7,42	0,15
400 - 450	5,43	5,61	0,18
450 - 500	10,94	11,16	0,22
500 - 550	9,44	9,62	0,18
550 - 600	7,68	8,08	0,4
600 - 650	8,13	8,27	0,14
650 - 700	10,67	10,83	0,16
700 - 750	7,99	8,24	0,25
750 - 800	6,90	7,04	0,14

Průměrná odchylka IRI profilu s korekcí a bez korekce je pro daný úsek 0,17 m/km.

VYHODNOCENÍ

Výsledná průměrná odchylka mezi hodnotami IRI vypočítaných z profilů s korekcí a bez korekce je poměrně nízká. Průběhy těchto profilů mají velice podobný tvar, který se výrazněji odlišuje spíše zřídka a v podstatě se příliš neliší velikostí amplitud a vlnových délek jednotlivých nerovností. Vypočítaný rozdíl v hodnotách indexu IRI je dokonce nižší než vypočítaná přesnost měřícího systému vypočítaná v kapitole 8.1 (před synchronizací profilů).

Podle grafického srovnání profilu s korekcí a profilu bez korekce je patrné, že mezi nimi existuje rozdíl, který se prohlubuje s horším technickým stavem povrchu silnice. Při výpočtu některých indexů drsnosti vozovky může mít tento efekt ale jen nepatrný vliv a bylo by možné jej zanedbat bez výraznějšího snížení přesnosti vypočítané hodnoty indexu.

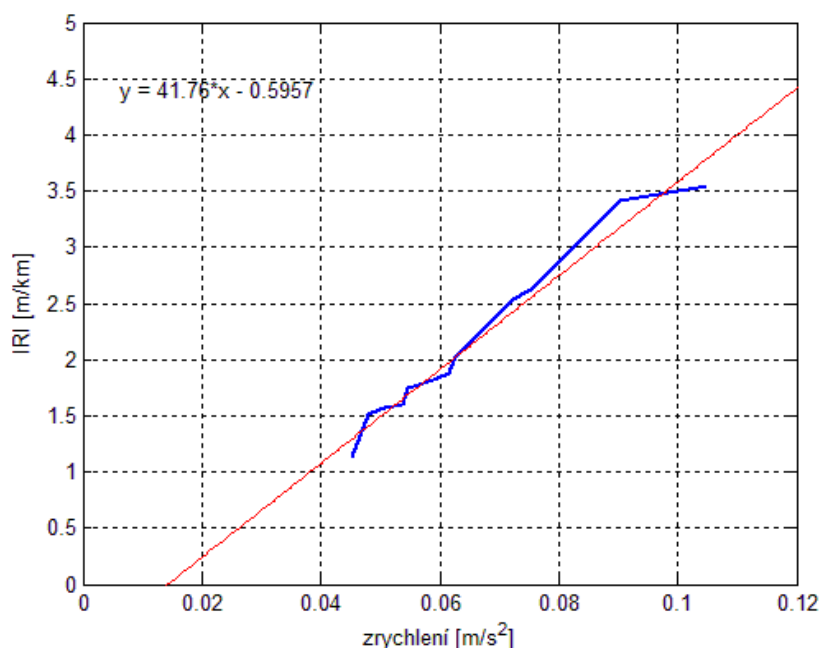
8.4 HODNOCENÍ DRSNOSTI VOZOVKY PODLE ZRYCHLENÍ ODPRUŽENÝCH HMOT

Navrhovaný měřící systém využívá pro analýzu tvaru vozovky laserový senzor vzdálenosti, akcelerometr a polohovací systém GPS. Zpracováním dat z těchto senzorů je vypočítán tvar profilu vozovky, který je dále potom analyzován, především z hlediska drsnosti povrchu silnice. Před pár lety se ale pro analýzu vozovky využívalo měření relativního pohybu nápravy vozidla vůči jeho karoserii. Naměřená hodnota byla pak přepočítána pomocí korelační rovnice na požadovaný index drsnosti vozovky, pro který byl měřící systém navržen (např. IRI). Měřící systém navržený v této diplomové práci nedisponuje možností měření relativního pohybu odpružených a neodpružených hmot a to především z toho důvodu, že tímto způsobem nelze zjistit „skutečný“ tvar profilu vozovky, ale jen reakci měřícího vozidla



na jízdu po daném úseku silniční sítě. Nabízí se ale otázka, zda nelze využít údaje z akcelerometru přímo pro posouzení drsnosti vozovky.

Grafickým zobrazením vypočítaných hodnot IRI v závislosti na kvadratickém průměru zrychlení odpružených hmot (funkce *rms* v Matlabu) příslušných danému úsekům lze pozorovat téměř lineární závislost. Zobrazeným průběhem dat lze tedy proložit přímkou, jejíž rovnice může posloužit jako korelační rovnice pro jiná měření. Protože zrychlení odpružených hmot je ovlivňováno stejnými faktory jako měření drsnosti vozovky pomocí systémů RTS, je naprosto nezbytné, aby všechna měření byla prováděna stejným měřicím vozidlem a při stejné jízdě rychlosti.



Obr. 74 Znárodnění lineární závislosti mezi indexem drsnosti IRI a kvadratickým průměrem zrychlení odpružených hmot

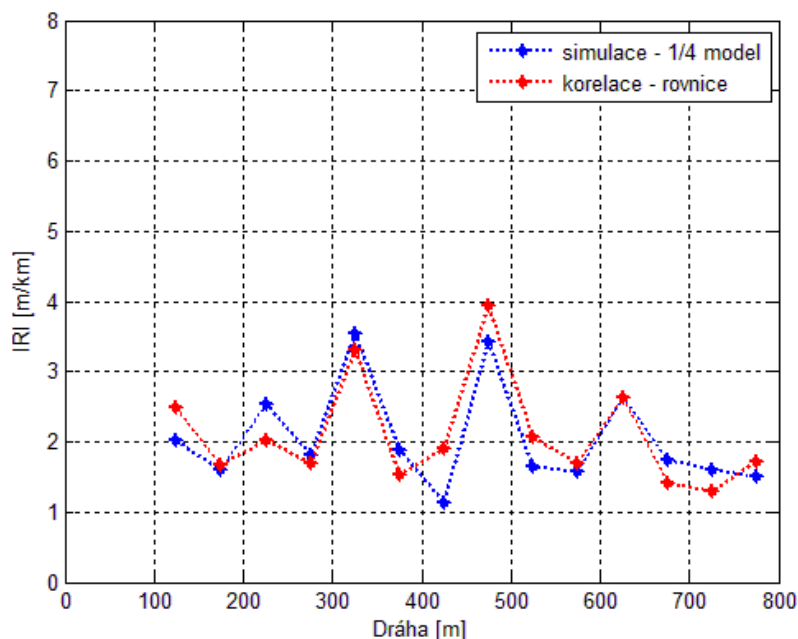
Pro sestavení korelační rovnice jsou využita data z měření provedeného na ulici Kolejní, viz kap. 8.1, úsek 1 (start od ulice Podnikatelská).

Tab. 8 Korelační rovnice získané měřením na stejném úseku vozovky

Číslo měření	Rovnice
1	$y = 41,76x - 0,5957$
2	$y = 44,39x - 0,7942$
3	$y = 45,37x - 0,7616$
4	$y = 46,62x - 0,7210$
Průměr	$y = 44,54x - 0,7181$



Získaná korelační rovnice je použita při výpočtu IRI z naměřených hodnot zrychlení odpružených hmot měřícího vozidla na úseku 2 (ulice Kolejní, start od zastávky Vědeckotechnologický park). Měření na těchto dvou úsecích bylo provedeno stejným měřícím vozidlem a při stejné rychlosti jízdy 40 km/h. Jedná se tedy o stejnou silnici, ale měřenou v druhém jízdním pruhu. Na následujícím obrázku lze pozorovat srovnání hodnot IRI získaných simulací čtvrtinového modelu automobilu a hodnot IRI vypočítaných s využitím korelační rovnice.

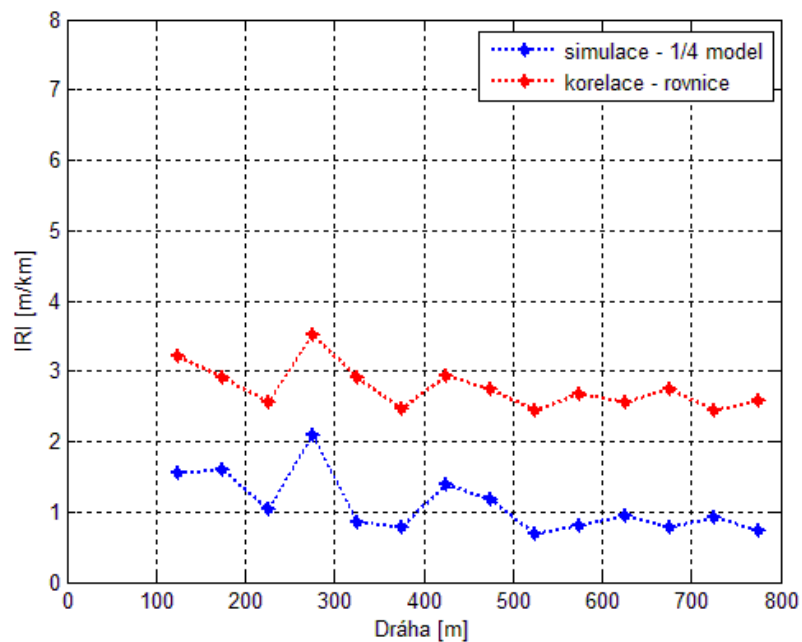


Obr. 75 Porovnání IRI získaného simulací 1/4 modelu automobilu a korelační rovnici

Tab. 9 Průměrné odchylky simulace a korelace

Číslo měření	Průměrná odchylka
1	0,26 m/km
2	0,34 m/km
3	0,36 m/km
4	0,36 m/km

Při použití korelační rovnice s koeficienty vypočítanými v předchozím kroku na úseku, kde nebyly dodrženy uvedené zásady, např. stejná rychlost měření, si získané hodnoty IRI obecně nebudou vzájemně odpovídat. Tuto skutečnost znázorňuje následující obrázek.



Obr. 76 Použití korelační rovnice z předchozího kroku pro data získaná při rychlosti měření 90 km/h.

VYHODNOCENÍ

Hodnoty kvadratického průměru zrychlení odpružených hmot vykazují určitou lineární závislost s indexem drsnosti vozovky IRI. Pohyb odpružených i neodpružených hmot jedoucího vozidla je ale do značné míry ovlivňován jeho dynamickými vlastnostmi a rychlostí jízdy. Z tohoto důvodu není možné přímé využití dat z akcelerometru pro přesné a objektivní posouzení drsnosti vozovky.

Za pomoci korelační rovnice lze tuto metodu využít pro analýzu drsnosti povrchu vozovky, kde není vyžadována příliš vysoká přesnost výsledného indexu drsnosti. Na rozdíl od navrhovaného měřicího systému je zde využít pouze akcelerometr připevněný ke karoserii měřicího vozu. Výpočet indexu drsnosti je velice jednoduchý a rychlý, neboť se jedná pouze o výpočet kvadratického průměru zrychlení odpružených hmot a následné dosazení do korelační rovnice.

Bohužel, pro možnost použití této metody je nezbytné mít k dispozici úsek vozovky se známou hodnotou IRI, který lze využít pro kalibraci systému. Bez kalibrace nemají naměřené hodnoty žádnou vypovídající hodnotu. Měření musí být prováděno při stejné rychlosti, s jakou byla prováděna kalibrace a při jakékoliv změně v podvozku či zatížení náprav měřicího vozidla je zapotřebí provést kalibraci novou. Korelační rovnice se mohou lišit i při dodržení výše uvedených pravidel, např. pokud jsou jednotlivé měřené úseky jiného typu (např. asfalt nebo beton) nebo mají výrazně odlišný technický stav.



9 KONSTRUKČNÍ NÁVRH

Konstrukční návrh zařízení pro analýzu profilu vozovky v této diplomové práci vychází především z příkladů dnes používaných inerciálních profilometrů. Tyto buďto sestávají z mechanismu, který je namontován na běžné vozidlo, nebo se jedná o samostatnou konstrukci podobnou přívěsnému vozíku, která je připojena k vozidlu pomocí tažného zařízení. Počítač a měřicí stanice je umístěna uvnitř vozidla stejně jako v popsaném experimentální měření.

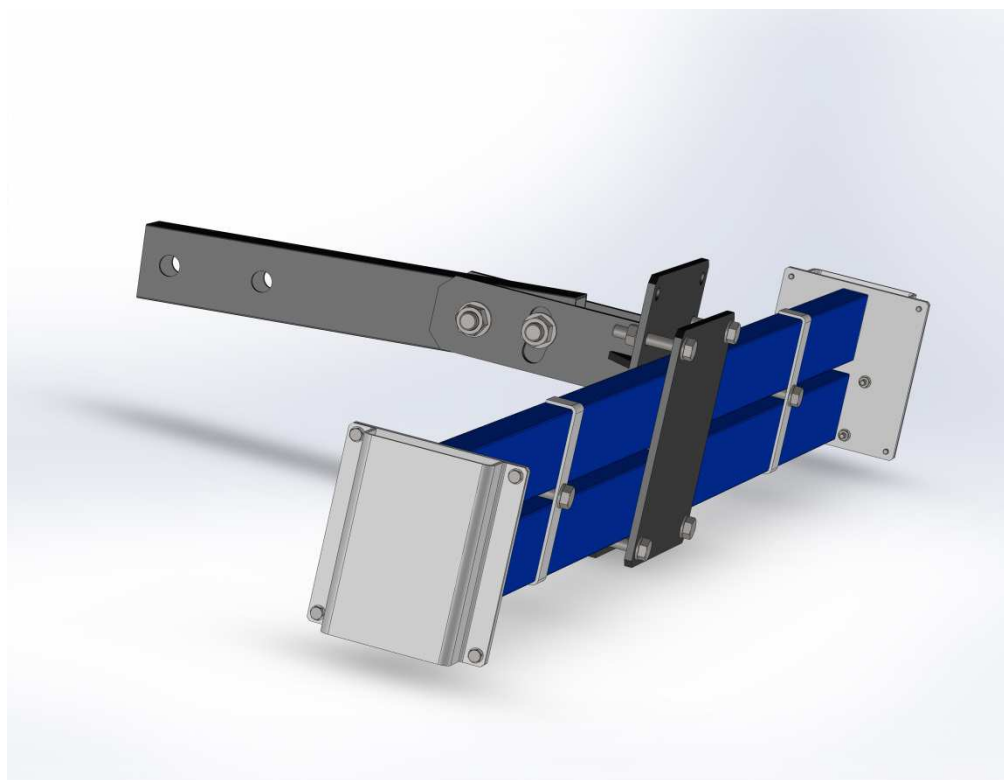


Obr. 77 Ukázka systém pro analýzu profilu vozovky [23]

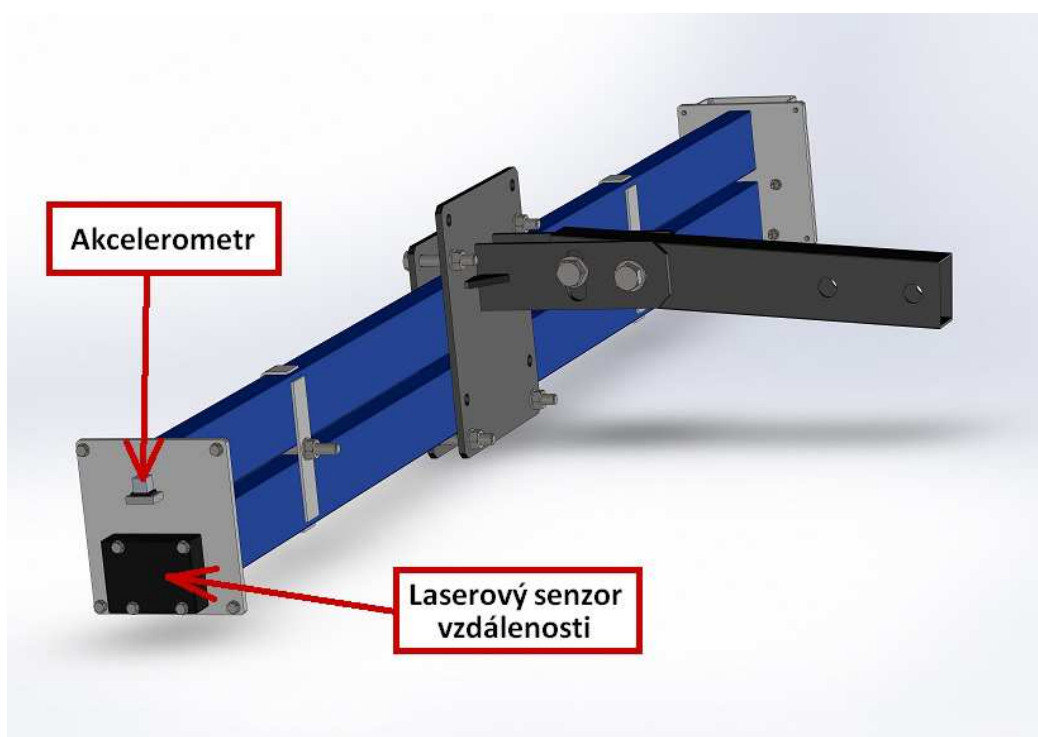
Při návrhu byl kladen důraz především na následující požadavky:

- funkčnost: zařízení musí umožňovat jednoduchou montáž a zapojení senzorů (2 laserové senzory vzdálenosti a 2 akcelerometry) a měření profilu ve dvou jízdních stopách
- spolehlivost
- snadná obsluha a údržba
- jednoduchá konstrukce
- nízké náklady na výrobu
- nízká hmotnost

S ohledem na požadované vlastnosti byla navržena konstrukce skládající se ze dvou posuvných ramen a držáku, který je připojen k tažnému zařízení osobního automobilu. Konstrukce umožňuje měření ve dvou jízdních stopách vzdálených od sebe až 1 500 mm a šířka konstrukce ve složeném stavu je 1 215 mm. Poloha ramen vůči držáku je zajištěna silovým stykem s přítlačnou deskou. Upevnění k tažnému zařízení je navrženo tak, aby umožňovalo částečné úhlové pootočení konstrukce v případě, že tažné zařízení není namontováno přesně vodorovně.



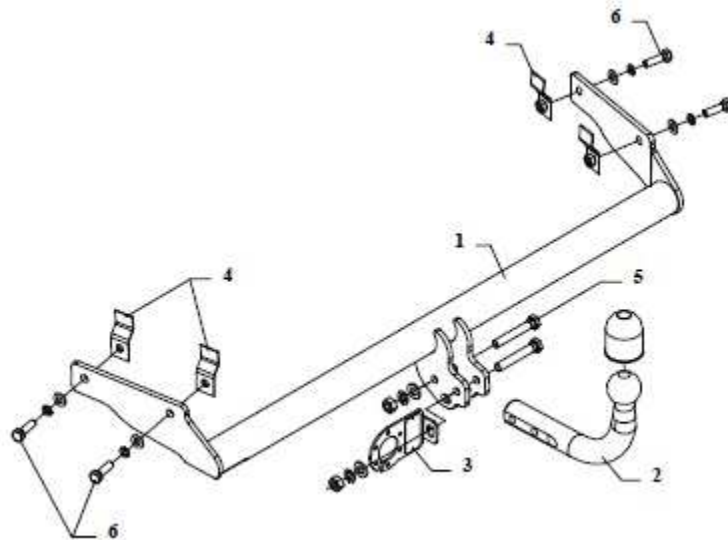
Obr. 78 Konstrukční návrh zařízení pro analýzu profilu vozovky



Obr. 79 Konstrukční návrh zařízení pro analýzu profilu vozovky – umístění senzorů



Konstrukce přijde namontovat k tažnému zařízení namísto jeho bajonetu, který je na následujícím obrázku označen číslicí 2. Spojovací součást konstrukce s tažným zařízením byla navržena pro tažné zařízení automobilu Škoda Felicia, ale měla by vyhovovat také většině ostatních vozů. V případě nekompatibility ale stačí nahradit spojovací součást, sestávající pouze z uzavřeného ocelového profilu.



Obr. 79 Tažné zařízení – Škoda Felicia [21]

Laserové senzory a akcelerometry jsou namontovány na držácích na konci posuvných ramen a jsou chráněny plechovým krytem.

Jako materiál pro konstrukci byla vybrána ocel 11 375 (1.0038). Jedná se o nelegovanou konstrukční ocel se zaručenou svařitelností. Používá se pro méně namáhané součásti, svařované konstrukce, plechové součásti apod.



ZÁVĚR

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo vytvoření metodiky pro analýzu profilu vozovky se zaměřením na nerovnosti, které ovlivňují jízdní vlastnosti automobilu. Úvodní část je věnována popisu metod a zařízení, které se používají pro hodnocení drsnosti vozovky v dnešní době, a také se částečně zabývá jejich vývojem v historii. Tato část nabývá na důležitosti především z toho důvodu, že existuje velice málo literatury na dané téma napsané v českém jazyce.

V rámci diplomové práce bylo provedeno experimentální měření, jehož hlavním cílem bylo získání dat z povrchu skutečné vozovky, která budou poté podrobena analýze pomocí navrženého matematického algoritmu. Experiment také posloužil k ověření funkce navrženého měřicího řetězce.

Navržená metodika zpracování naměřených dat se zaměřuje především na analýzu povrchu vozovky se zaměřením na nerovnosti, které ovlivňují jízdní vlastnosti vozidel a negativně působí na jízdní komfort cestujících. Za tímto účelem byl v prostředí Matlab vytvořen skript pro výpočet IRI a RN, které dnes patří k nejběžněji používaným indexům drsnosti vozovky. Za tímto účelem bylo zapotřebí vytvořit čtvrtinový model automobilu. Vzhledem k relativní jednoduchosti byla pro tento účel vybrána nástavba softwaru Matlab, prostředí Simulink. Navržený model umožňuje simulaci pohybu odpružených i neodpružených hmot při jízdě po naměřeném (vypočítaném) profilu vozovky.

Pro porovnání jednotlivých změřených úseků vozovky je využita také Fourierova transformace, která umožňuje přesnější pohled na zastoupení a význam nerovností s určitou vlnovou délkou.

Kapitola 8.4 se zabývá možností využití zrychlení odpružené hmoty pro hodnocení drsnosti vozovky, konkrétně přepočítání kvadratického průměru naměřených hodnot pomocí korelační rovnice na hodnoty IRI. Jedná se tedy o metodu, která využívá záznamu reakce konkrétního vozidla na jízdu po určitém úseku silnice danou rychlostí. Zařízení, která využívají tuto metodiku, ať už dnes nebo v minulosti, ve většině případů zaznamenávají relativní pohyb odpružené a neodpružené hmoty, který je následně přepočítán pomocí korelační rovnice na IRI. Experimentální měření však ukázala, že s určitými omezeními a snížením přesnosti lze pro tento účel využít i samotné zrychlení odpružených hmot.

V diplomové práci jsou popsány a analyzovány efekty, které významně ovlivňují výsledný profil vozovky a hodnoty vypočítaných indexu drsnosti vozovky. V některých případech však nebylo k dispozici dostatečné množství dat pro vytvoření obecných závěrů, např. při vyhodnocení vlivu měřicí rychlosti na výsledný profil. Za tímto účelem by bylo zapotřebí provést měření o mnohem větším rozsahu a za přísnějších kontrolních podmínek.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. ISBN 80-238-5273-6. Nakladatelství VLK, Brno 2000
- [2] GILLESPIE, T. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992, 495 p. ISBN 15-609-1199-9.
- [3] DIXON, J. C. *Tires, suspension and handling*. ISBN 1-56091-831-4, SAE International, Warrendale 1996.
- [4] SAYERS, M., KARAMIHAS, S. M. *The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*. University of Michigan: Transportation Research Institute (UMTRI), 1998. Dostupné z: <http://www.umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf>
- [5] COMMITTEE OF TRANSPORT OFFICIALS (SOUTH AFRICA). *Guidelines for Network Level Measurement of Road Roughness*. 2007. Dostupné z: <http://www.nra.co.za/content/Blogin/TMH10.pdf>
- [6] IVÁNKŮV BLOG. Fourierova transformace srozumitelně. In: *Blogger* [online]. 2013-11-24 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://ivankuckir.blogspot.cz/2013/11/fourierova-transformace-srozumitelne.html>
- [7] ARRB GROUP. Walking profiler G3. *arrb.com* [online]. Dostupné z: <https://www.arrb.com.au/Equipment-services/Walking-Profiler-G3.aspx>
- [8] VOJÁČEK, A. Principy akcelerometrů – 1. díl - Piezoelektrické [online]. 2007-01-14 [cit. 2016-03-11]. <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [9] BRÜEL & KJAER. 4524 – Triaxial CCLD piezoelectric accelerometer. *bksv.com* [online]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4524?tab=overview>
- [10] Laser Sensors – Triangulation Principle. In: *Youtube* [online]. 20.12.2010 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=HsHyYB7ObCU>. Kanál uživatele laplaser.
- [11] AB DYNAMICS. Corrsys-Datron Optical Sensors. *abd-mf-jp.com* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://www.abd-mf-jp.com/item/corrsys/index_e.html
- [12] OXTS INERTIAL+GPS. RT3000 v2 Family. *oxts.com* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://www.oxts.com/products/rt3000-family/>
- [13] IMC PRODUCTIVE TESTING. imc CRONOSflex: Frameless modular measurement systém. *imc-berlin.com* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://www.imc-berlin.com/products/measurement-hardware/imc-cronosflex/overview/>
- [14] CUNDILL, M. A. The MERLIN low-cost road roughness measuring machine. Transport and Road Research Laboratory. 1991. Dostupné z: <http://www.transport->



links.org/transport_links/filearea/publications/1_270_RR301_MERLIN%20low-cost%20road%20roughness%20measuring%20device.pdf

- [15] MORROW, G. Comparison of Roughness Measuring Instruments. University of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland, New Zealand. 2006. Dostupné z: <http://www.lpcb.org/index.php/documents/data-collection/roughness/155-2005-new-zealand-comparison-of-roughness-measuring-instruments/file>
- [16] OPENDTECT USER DOCUMENTATION VERSION 4.6. Frequency Filter. *opendtect.org* [online] [cit. 2016-03-11] Dostupné z: http://www.opendtect.org/reلمان/4.6.0/unpacked/4.6.0/doc/User/base/appendix_frequency-filter.htm
- [17] NOVOTNÝ, P. Počítačové simulace v automobilovém průmyslu II. (přednáška) FSI VUT Brno.
- [18] MATHWORKS. Matlab. *mathworks.com* [online] [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>
- [19] CURTISS-WRIGHT. SLS095 – Linear Displacement Sensor. *cw-industrialgroup.com* [online] [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://www.cw-industrialgroup.com/Products/Sensors/Linear-Position-Sensors-Transducers/Linear-Displacement-Sensor-SLS095.aspx>
- [20] Mapy.cz. *mapy.cz* [online] [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <https://mapy.cz/turisticka?x=15.6252330&y=49.8022514&z=8>
- [21] TAŽNÉ ZARÍZENÍ – LEVNĚ. Tažné zařízení ŠKODA Felicia 5 dvěř. *amsa.cz* [online] [cit. 2016-03-11] Dostupné z: <http://www.amsa.cz/Skoda-47703/331-Ta%C5%BEn%C3%A9-za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD-%C5%A0KODA-Felicia-5-dv%C3%A9%C5%99>
- [22] KATALOG AUTOMOBILŮ. Galerie automobilů Škoda Felicia. *katalog-automobilu.cz* [online] [cit. 2016-03-11] Dostupné z: <http://galerie.katalog-automobilu.cz/znacka-skoda/model-skoda-felicia/#!prettyPhoto>
- [23] TRIMAT. Laser Inertial Profiling – ASTM E950 & ALDOT 448-12. *trimattesting.com* [online] [cit. 2016-03-11] Dostupné z: <http://www.trimattesting.com/pavements/>
- [24] GILLESPIE, T. D., SAYERS, M. W., SEGEL, L. *Calibration and Correlation of Response-type Road Roughness Measuring Systems*. University of Michigan: Highway Safety Research Institute, 1980. Dostupné z: https://www.google.cz/?gws_rd=ssl#q=Calibration+and+Correlation+of+Response-type+Road+Roughness+Measuring+Systems
- [25] SAYERS, M. W., GILLESPIE, T. D., a spol. *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. The World Bank, 1986. Dostupné z: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/3133/72764.pdf?sequence=2>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

a_{ef}	$[m \cdot s^{-1}]$	efektivní zrychlení
B	[m]	průměrovací interval (baselength)
c_1	$[N \cdot m^{-1}]$	tuhost pneumatiky
c_2	$[N \cdot m^{-1}]$	tuhost pružiny
E_D	[J]	disipativní energie
E_K	[J]	kinetická energie
E_P	[J]	potenciální energie
F_{c1}	[N]	pružící síla pneumatiky
F_{c2}	[N]	pružící síla pružiny
F_{k1}	[N]	tlumící síla pneumatiky
F_{k2}	[N]	tlumící síla pružiny
f_{mi}	[Hz]	střední frekvence třetinooktávového pásma
h, h_0	[m]	výška nerovností
HRI	$[m \cdot km^{-1}]$	Half-Car Index
IRI	$[m \cdot km^{-1}]$	International Roughness Index
k_1	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	součinitel tlumení pneumatiky
k_2	$[N \cdot s \cdot m^{-1}]$	součinitel tlumení tlumiče
l	[m]	rozvor vozidla
L	[m]	ujetá dráha
m_1	[kg]	hmotnost neodpružené hmoty
m_2	[kg]	hmotnost odpružené hmoty
p_{fH}	[-]	filtrovaný profil (high-pass)
p_{fL}	[-]	filtrovaný profil (low-pass)
PI	$[m \cdot m^{-1}]$	Profile Index
RN	[-]	Ride Number
t	[s]	čas



T	[s]	perioda
x	[m]	dráha
z_0	[m]	výška nerovností
z_1	[m]	výchylka neodpružené hmoty
z_2	[m]	výchylka odpružené hmoty
z_{1rel}	[m]	relativní výchylka neodpružené hmoty vůči vozovce
z_{2rel}	[m]	relativní výchylka neodpružené hmoty vůči hmotě odpružené
λ	[m]	vlnová délka nerovností
ω	[s ⁻¹]	úhlová frekvence
Ω	[m ⁻¹]	dráhová úhlová frekvence
φ	[rad]	fázový úhel



SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – analýza naměřených dat (str. P1 až P16)

Příloha 2 – skript (Matlab)

Příloha 3 – 3D model konstrukce (SolidWorks)

Příloha 4 – výkresová dokumentace (16 výkresů + 5 kusovníků, formát *dwg*)

Příloha 5 – naměřená data

Přílohy 2 až 5 jsou uloženy na přiloženém CD.



ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT

V rámci této diplomové práce bylo provedeno měření za účelem analýzy povrchu vozovky na několika různých lokalitách. Při vyhodnocování dat je vždy vybrán reprezentativní vzorek, jehož délka se liší podle délky měření. Tento vzorek je rozdělen na kratší úseky s délkou 50 metrů, pro které jsou vypočítány hodnoty IRI a RN. U každé lokality je grafické srovnání průběhu profilů a PSD funkcí úseků s nejmenší a nejvyšší hodnotou IRI.

LOKALITY MĚŘENÍ:

1. Brno – Královo Pole, ulice Kolejní
2. Silnice R43 (E461), směr Brno – Kuřim
3. Jinačovice
4. Spojnice Jinačovice – Kuřim
5. Moravské Knínice

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE:

Mapy lokalit jsou převzaty ze serveru: *mapy.cz* [online] [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <https://mapy.cz/turisticka?x=15.6252330&y=49.8022514&z=8>



1 BRNO – KRÁLOVO POLE, ULICE KOLEJNÍ

soubor: 2015-5-19_11-37-34.mat

GPS souřadnice: start 49.2281 N 16.5766 E

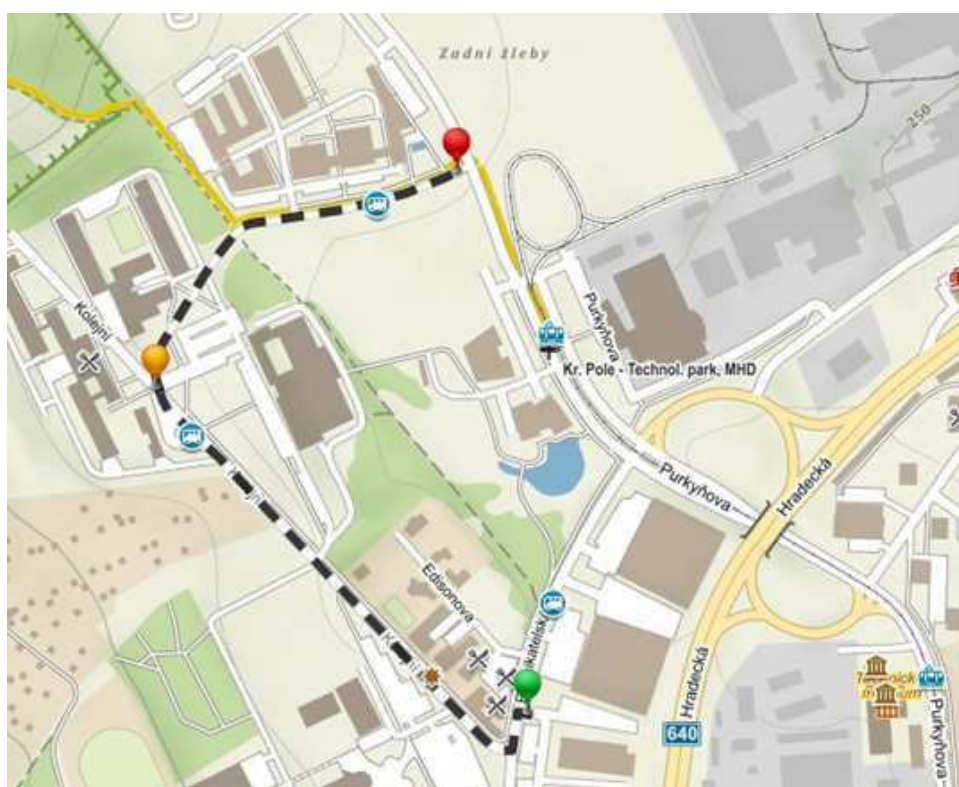
konec 49.233 N 16.5756 E

datum: 19. 5. 2015

délka měřeného úseku: 961 m

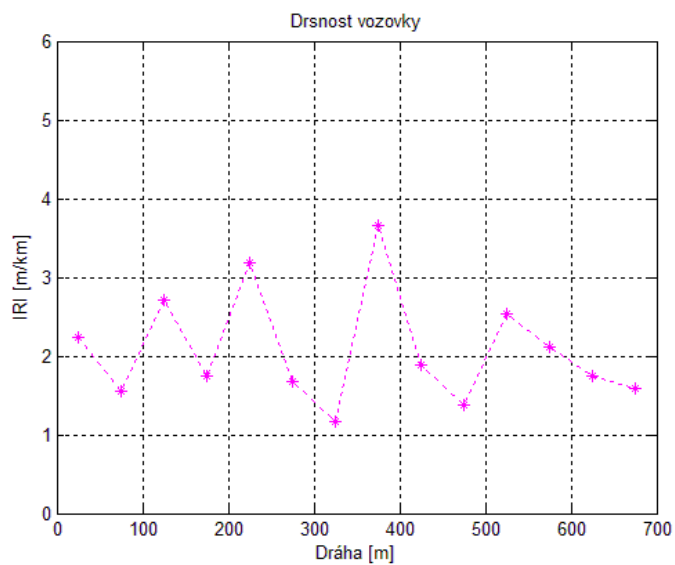
průměrná rychlost: 39 km/h

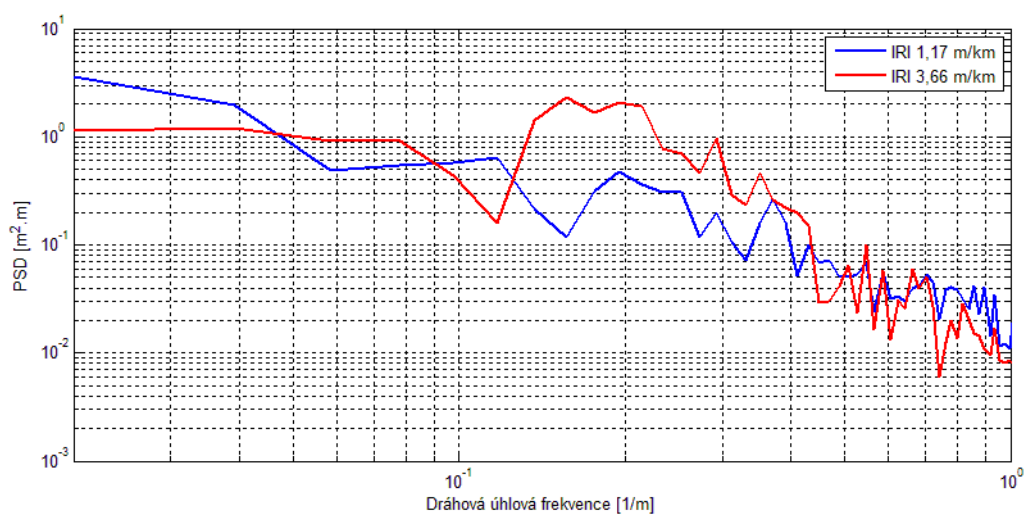
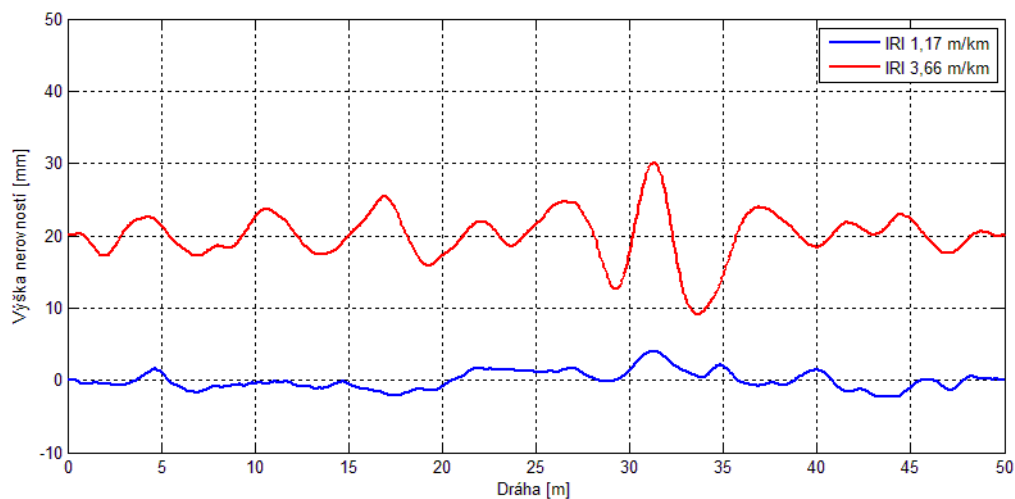
analyzovaný úsek: 100 – 800 m (700 m)





úsek [m]	IRI [m/km]	RN [-]
0 – 50	2,33	3,58
50 – 100	1,55	3,96
100 – 150	2,71	3,34
150 – 200	1,74	3,95
200 – 250	3,18	3,08
250 – 300	1,68	3,96
300 – 350	1,17	4,24
350 – 400	3,66	2,74
400 – 450	1,88	3,67
450 – 500	1,38	4,06
500 – 550	2,54	3,30
550 – 600	2,12	3,69
600 – 650	1,75	3,94
650 – 700	1,59	3,96
celkový	2,14	3,61







2 SILNICE E461 (R43), SMĚR BRNO – KUŘIM

soubor: 2015-5-19_11-52-55.mat

GPS souřadnice: start 49.2391 N 16.5893 E

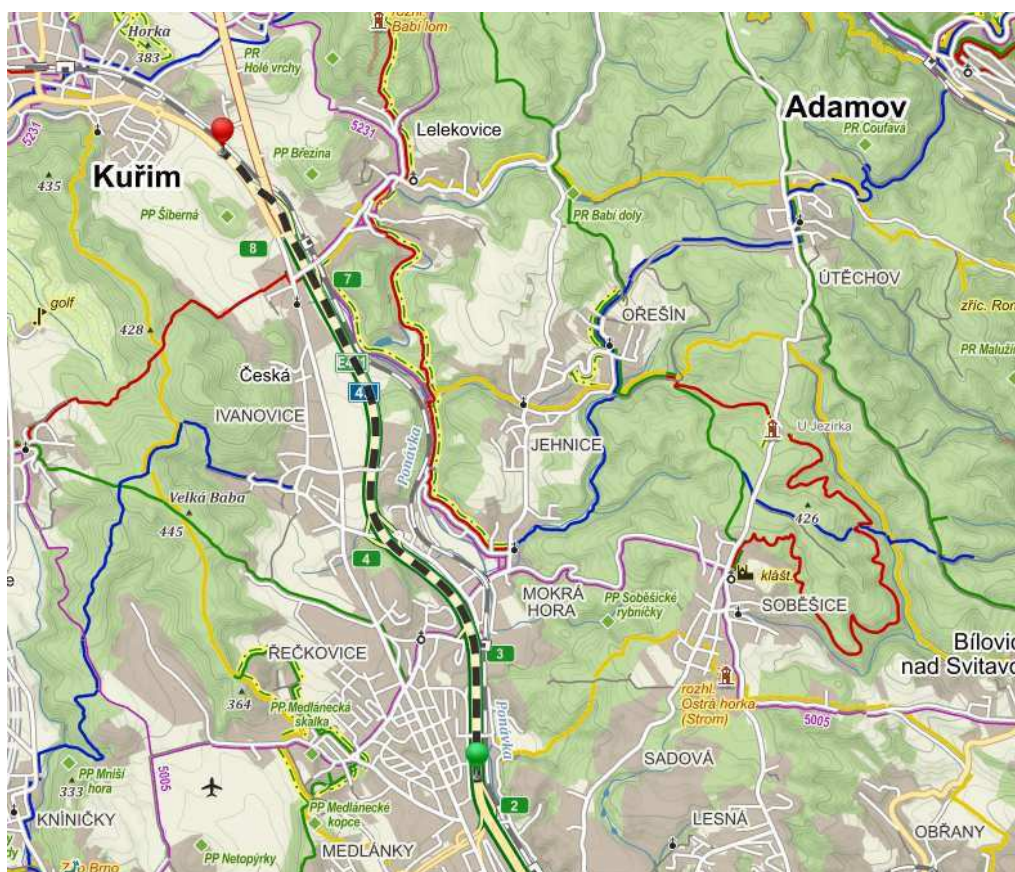
konec 49.2936 N 16.5554 E

datum: 19. 5. 2015

délka měřeného úseku: 6 890 m

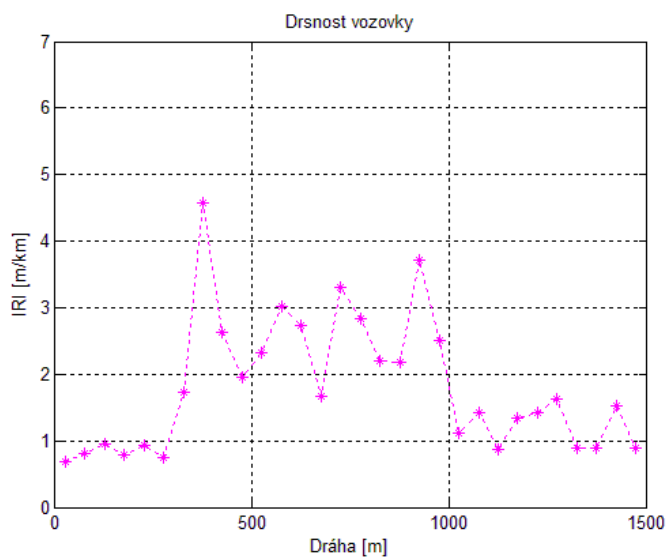
průměrná rychlost: 90 km/h

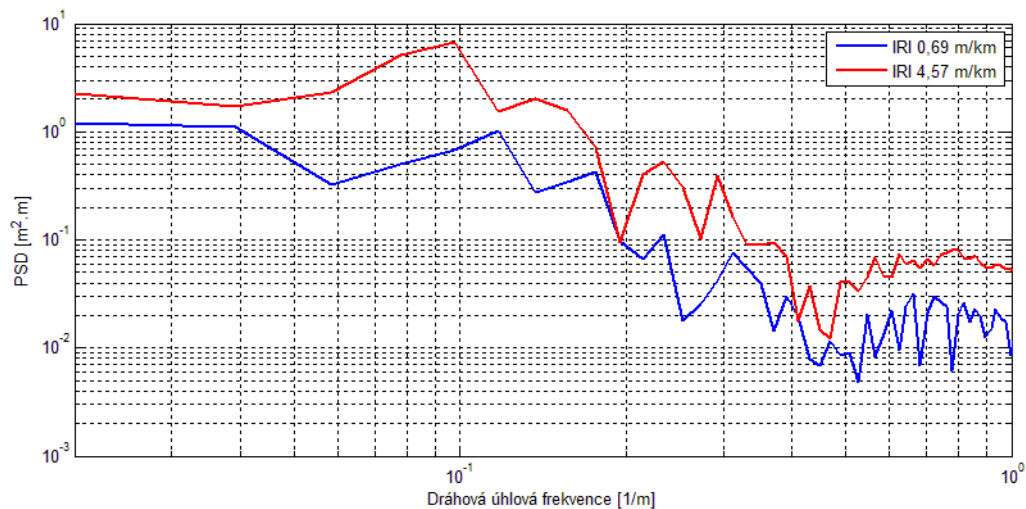
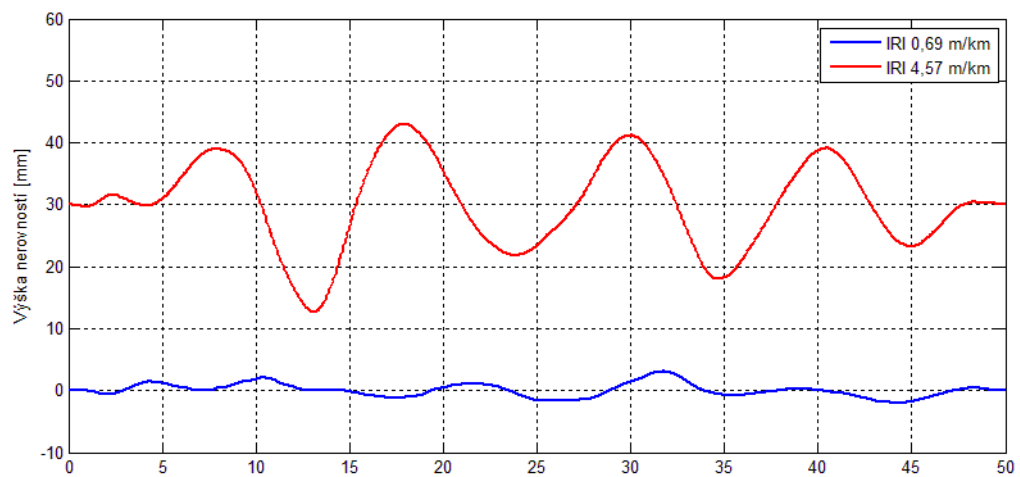
analyzovaný úsek: 500 – 2 000 m (1 500 m)





úsek [m]	IRI [m/km]	RN [-]
0 – 50	0,69	4,53
50 – 100	0,81	4,48
100 – 150	0,95	4,47
150 – 200	0,78	4,48
200 – 250	0,93	4,48
250 – 300	0,74	4,56
300 – 350	1,72	3,87
350 – 400	4,57	3,34
400 – 450	2,63	3,95
450 – 500	1,96	4,17
500 – 550	2,32	3,91
550 – 600	3,01	3,53
600 – 650	2,73	3,84
650 – 700	1,66	3,93
700 – 750	3,31	3,46
750 – 800	2,84	3,51
800 – 850	2,20	3,69
850 – 900	2,19	3,81
900 – 950	3,71	3,38
950 – 1000	2,51	4,16
1 000 – 1 050	1,12	4,31
1 050 – 1 100	1,43	4,30
1 100 – 1 150	0,86	4,54
1 150 – 1 200	1,34	4,28
1 200 – 1 250	1,42	4,28
1 250 – 1 300	1,62	4,40
1 300 – 1 350	0,89	4,41
1 350 – 1 400	0,90	4,35
1 400 – 1 450	1,53	4,28
1 450 – 1 500	0,89	4,48
celkový	2,01	4,08







3 JINAČOVICE

soubor: 2015-5-19_12-14-31.mat

GPS souřadnice: start 49.2701 N 16.5236 E

konec 49.2658 N 16.5232 E

datum: 19. 5. 2015

délka měřeného úseku: 614 m

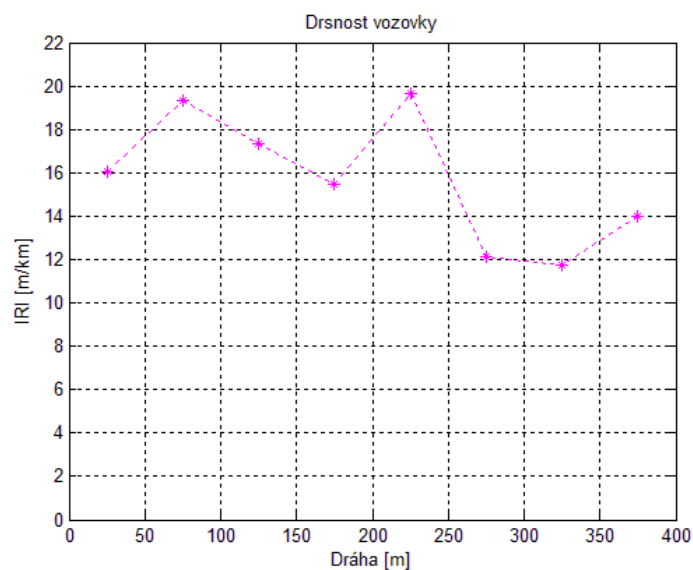
průměrná rychlost: 28 km/h

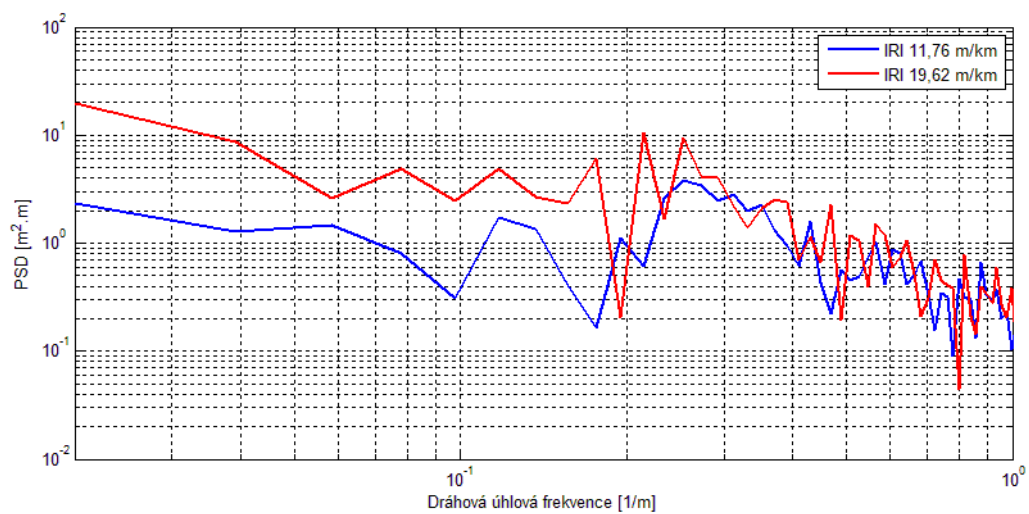
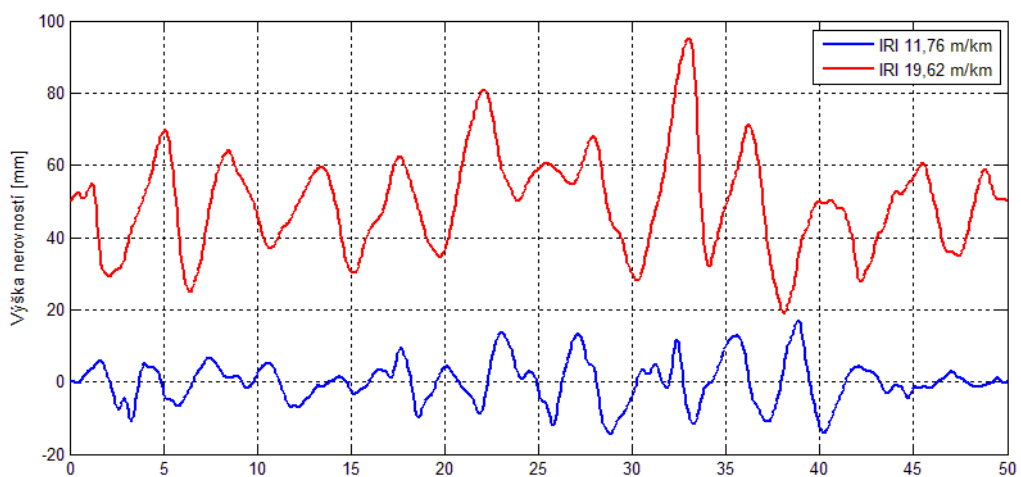
analyzovaný úsek: 100 – 500 m (400 m)





úsek [m]	IRI [m/km]	RN [-]
0 – 50	16,06	0,52
50 – 100	19,30	0,37
100 – 150	17,36	0,45
150 – 200	15,50	0,63
200 – 250	19,62	0,25
250 – 300	12,13	0,78
300 – 350	11,76	0,87
350 – 400	13,99	0,59
celkový	16,14	0,49







4 SPOJNICE JINAČOVICE – KUŘIM

soubor: 2015-5-19_12-21-15.mat

GPS souřadnice: start 49.2698 N 16.5271 E

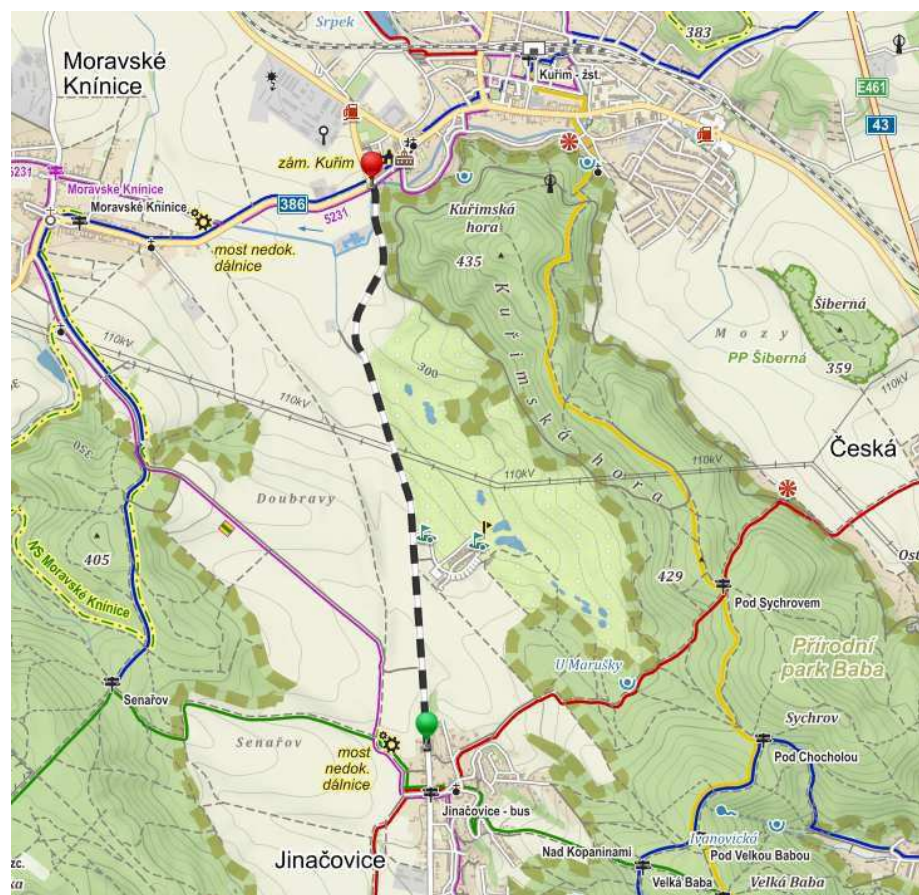
konec 49.2948 N 16.5233 E

datum: 19. 5. 2015

délka měřeného úseku: 2 869 m

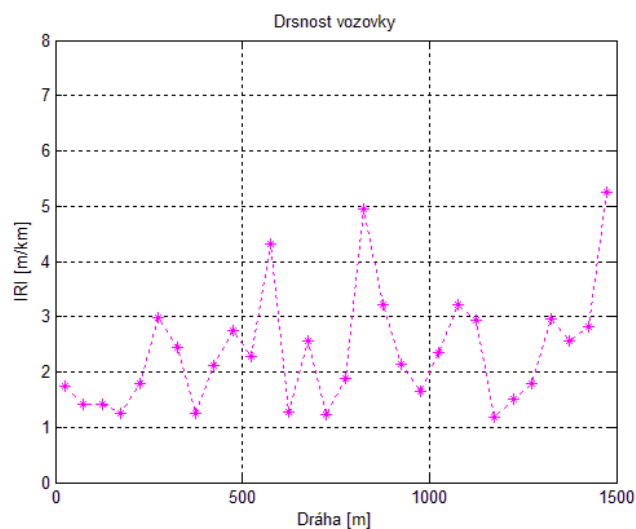
průměrná rychlost: 78 km/h

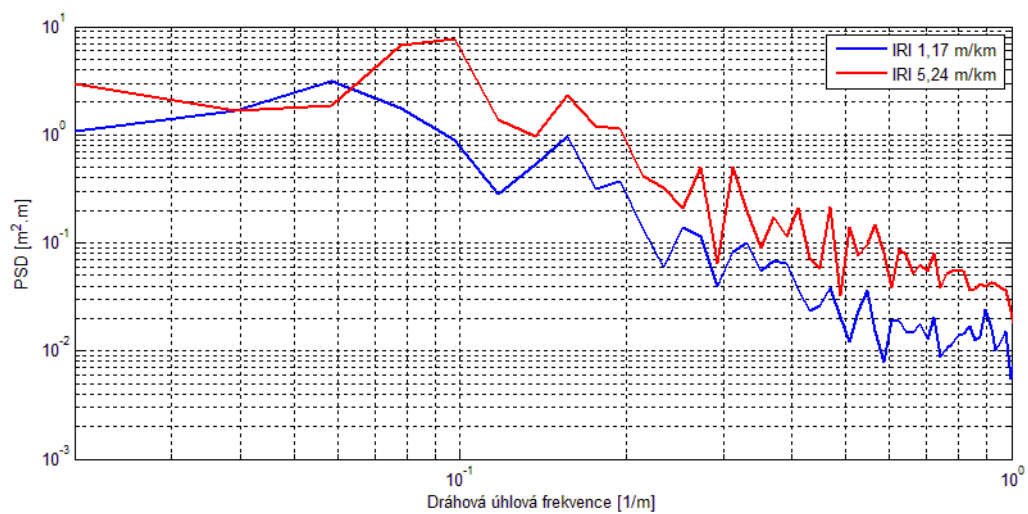
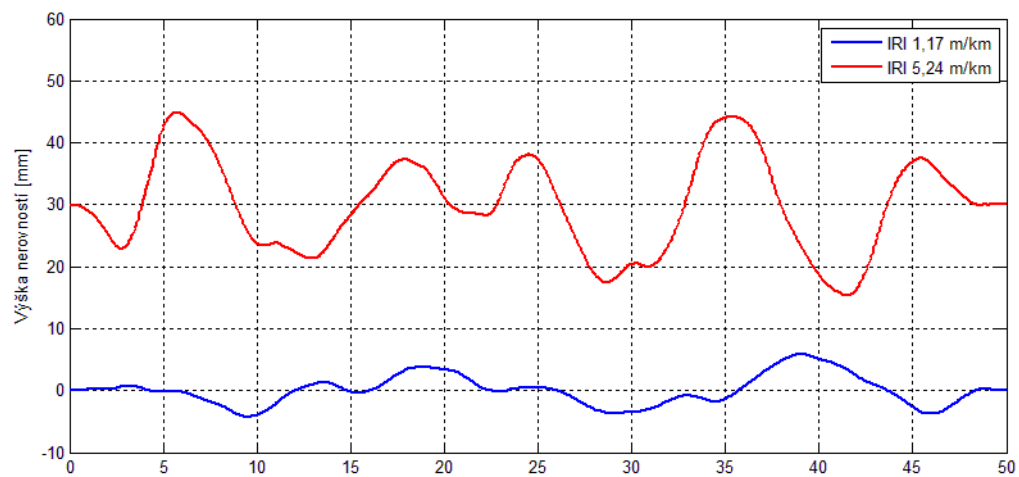
analyzovaný úsek: 500 – 2 000 m (1 500 m)





úsek [m]	IRI [m/km]	RN [-]
0 – 50	1,75	4,12
50 – 100	1,42	4,28
100 – 150	1,41	4,29
150 – 200	1,24	4,29
200 – 250	1,78	4,06
250 – 300	2,99	3,80
300 – 350	2,45	4,20
350 – 400	1,25	4,33
400 – 450	2,12	3,83
450 – 500	2,76	3,41
500 – 550	2,29	3,80
550 – 600	4,32	3,21
600 – 650	1,28	4,53
650 – 700	2,57	3,67
700 – 750	1,23	4,47
750 – 800	1,88	3,99
800 – 850	4,94	3,04
850 – 900	3,22	3,74
900 – 950	2,14	3,75
950 – 1000	1,65	3,96
1 000 – 1 050	2,35	3,87
1 050 – 1 100	3,21	3,42
1 100 – 1 150	2,94	3,82
1 150 – 1 200	1,17	4,27
1 200 – 1 250	1,51	4,14
1 250 – 1 300	1,79	4,13
1 300 – 1 350	2,95	3,67
1 350 – 1 400	2,56	3,77
1 400 – 1 450	2,82	3,57
1 450 – 1 500	5,24	2,90
celkový	2,64	3,84







úsek [m]	IRI [m/km]	RN [-]
0 – 50	4,25	2,89
50 – 100	8,56	2,43
100 – 150	6,53	2,68
150 – 200	3,92	3,20
200 – 250	4,20	3,25
250 – 300	3,64	3,02
300 – 350	7,02	2,48
350 – 400	5,98	2,92
400 – 450	3,46	3,33
450 – 500	3,39	3,67
500 – 550	3,41	3,55
550 – 600	4,03	3,20
600 – 650	10,14	1,52
650 – 700	6,65	2,23
celkový	6,22	2,83

