



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VYUŽITÍ INERCIÁLNÍ MĚŘICÍ JEDNOTKY PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ SILNICE

INERTIAL MEASUREMENT UNIT FOR ROAD PARAMETER MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ TOMAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR HOLCNER, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Ondřej Toman

Název Využití inerciální měřicí jednotky pro měření parametrů silnice

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2013

Datum odevzdání bakalářské práce 30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

.....
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

ČSN 736301 Projektování silnic a dálnic

ČSN 73 6102 Projektování křižovatek na silničních komunikacích

ČSN 73 6175 Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek

Špůrek J.: Silniční stavitelství I – projektování silnic a dálnic, Praha, 1972

Zákon 361/2000Sb. o provozu na pozemních komunikacích

Manuály Analog Devices ADIS16400BMLZ a ADISUSBZ

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Zjistěte a posuďte současné možnosti sledování stavu vozidla, parametrů komunikace a stavu komunikace pomocí inerciální měřicí jednotky IMU.

Proveďte vlastnosti těchto zařízení a jejich využitelnost pro potřeby dopravních měření.

Navrhněte vhodné metody. Naměřené výsledky porovnejte s projekčními parametry komunikací.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá měřením nerovností vozovek. To bylo prováděno pomocí inerciální měřicí jednotky. Pro ověření použití tohoto přístroje bylo testováno několik vozovek s odlišným povrchem. Cílem této práce je popis práce s inerciální měřicí jednotkou, popis měření a jeho provedení, zhodnocení a ověření použití inerciální měřicí jednotky pro analýzu nerovností vozovek. V závěru je práce doplněna o doporučení pro zlepšení.

Klíčová slova

Inerciální měřicí jednotka, rychlá Fourierova transformace

Abstract

Bachelor's thesis deals with the measurement of unevenness of roadways, which was performed using inertial measuring unit. Different types of road surfaces were tested to check usage of inertial measuring unit. The aim of this thesis is the introduction to the inertial measuring unit as well as description of the measurement and its performance, evaluation, verification of usage of the inertial measuring unit and recommendation for improvement.

Key words

Inertial measuring unit, fast Fourier transform

Bibliografická citace VŠKP

Ondřej Toman *Využití inerciální měřicí jednotky pro měření parametrů silnice*. Brno, 2014. 42 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 18.5.2014

.....
podpis autora
Ondřej Toman

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 18.5.2014

.....
podpis autora
Ondřej Toman

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce doc. Ing. Petru Holcnerovi, Ph.D. za ochotu a pomoc při vypracování mé bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu při studiu.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Princip činnosti.....	12
3. Konstrukce inerciálních měřicích systémů.....	13
3.1. Systémy stabilizované vzhledem k terestrické souřadnicové soustavě	13
3.2. Systémy stabilizované vzhledem ke geocentrické souřadnicové soustavě.....	14
3.3. Strapdown systémy.....	14
4. Vývoj inerciálních měřicích systémů	15
4.1. Standardní inerciální měřicí systémy	17
4.2. Inerciální měřicí systémy střední přesnosti	17
4.3. Inerciální měřicí systémy vysoké přesnosti.....	18
5. Přístroje pro měření rovnosti povrchu vozovek	18
5.1. Přístroj pro přímé měření rovnosti vozovek	18
5.1.1. Příložené latě.....	18
5.1.2. Československý stabilní nosíkový profilograf VUT	19
5.2. Přístroje pro nepřímé měření rovností povrchu vozovky	20
5.2.1. Měření podélné nerovnosti povrchu vozovky profilometrem s dvoumotovým odezvo­vým systémem	20
5.2.2. Československý profilograf VVSL – ČVUT.....	21
5.3. Přístroje založené na bezkontaktním měření rovnosti povrchu komunikací	22
5.3.1. Multifunkční zařízení ARAN	22
6. Měřicí zařízení.....	23
6.1. ADIS16400 iSensor ®.....	23
6.2. Akcelerometr	23
6.3. Gyroskop	24
6.4. ADISUSBZ	24
6.5. Program Analog Devices – AdiS 16405 Evaluation Software –Rev 3	25
7. Návrh a provedení experimentu	26
7.1. Připevnění IMU a její vyrovnaní	26

7.2.	Kontrola připojení IMU a podmínky při měření	26
7.3.	Zkoumané vozovky	27
8.	Úvod do způsobů vyhodnocení naměřených dat.....	27
8.1.	Kvantitativní hodnocení vibrací v časové oblasti.....	27
8.2.	Kmitočtová analýza.....	28
8.3.	Fourierova transformace.....	28
8.3.1.	Rychlá Fourierova transformace (FFT).....	30
9.	Výsledky.....	30
9.1.	Zpracování výsledků	30
9.1.1.	Kvantitativní hodnocení v časové oblasti.....	31
9.1.2.	Rychlá Fourierova transformace v programu Microsoft Excel pro kmitočtovou analýzu 31	
10.	Prezentace výsledků	32
10.1.	Vozovka z žulových kostek.....	32
10.2.	Silnice II/129	34
10.3.	Panelová vozovka v záplavové oblasti	36
10.4.	Místní komunikace	38
10.5.	Porovnání hodnocení rovnosti vozovek	40
11.	Závěr.....	41
12.	Použité zdroje	42

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Záznam průběhu zrychlení, rychlosti a vektoru dráhy.....	13
Obrázek 2 – Postup měření nerovností příložnou latí. Zdroj: ČSN 73 6175.....	19
Obrázek 3 – Dvuhmotový referenční odezvosý systém. Zdroj: ČSN 73 6175	20
Obrázek 4 – vozidlo proměření podélných nerovností.....	22
Obrázek 5 – vozidlo proměření podélných nerovností.....	22
Obrázek 6 – zařízení ANALOG DEVICES ADIS 16400BMLZ.....	23
Obrázek 7 – zařízení ADISUSBZ	23
Obrázek 8 – Připevnění IMU na palubní desce.....	26
Obrázek 9 – Převod popisu signálu mezi časovou a frekvenční oblastí.....	29
Obrázek 10 – Odlišnost náhledu na tentýž signál.....	29
Obrázek 11 – Srovnání náročnosti výpočtu DFT a FFT	30
Obrázek 12 – Vozovka ze žulových kostek	32
Obrázek 13 – Silnice II/129.....	34
Obrázek 14 – Panelová vozovka v záplavové oblasti.....	36
Obrázek 15 – Místní komunikace.....	38

1. Úvod

V bakalářské práci se zabývám inerciální měřicí jednotkou a jejím využitím při měření parametrů silnic. Inerciální měřicí jednotka (IMU) je elektronické zařízení, které pomocí kombinace gyroskopů a akcelerátorů podává informace o zrychlení a orientaci v prostoru. IMU je základní součástí všech inerciálních měřicích systémů, které slouží k dopravním měřením (multifunkční zařízení ARAN). Nachází se v inerciálních navigačních systémech v letadlech i lodích.

Teoretická část práce obsahuje popis principu činnosti, konstrukce a vývoje IMU. Dále jsem se věnoval jiným možnostem měření rovnosti povrchu vozovek. Uvedl jsem několik vývojových příkladů z minulosti a několik případů měření rovnosti povrchu vozovek, které se používají v dnešní době.

V praktické části jsem popsal postup vlastního experimentu. Zvolil jsem několik rozdílných povrchů, na kterých je patrný rozdíl zrychlení v ose Z (osa Z je svislá osa směřující do středu Země), protože textura jednotlivých povrchů vozovek je velmi rozdílná. Naměřené hodnoty jsem zpracoval v programu Microsoft Excel s pomocí rychlé Fourierovy analýzy. Výsledkem jsou graf zrychlení a graf amplitudové frekvenční analýzy. Dále také kvantitativní hodnocení v časové oblasti a výpočet místa (délky opakování) poruchy z frekvence.

Tato nová metoda měření podélné nerovnosti povrchu vozovky vozidlem se snímačem svislého zrychlení je popsána v normě ČSN 73 6175, tento způsob měření se používá v multifunkčním zařízení ARAN. V blízké době by tento způsob mohl díky nižší náročnosti na čas, obsluhu, zdokonalování zařízení a zpracování dat mohl nahradit starší způsoby měření podélné nerovnosti jako např. měření podélné nerovnosti povrchu vozovky latí.

Cíle bakalářské práce jsou:

- popis principu činnosti IMU
- popis vývoje IMU
- popis přístrojů na měření rovnosti povrchu komunikací
- návrh a provedení experimentu
- vyhodnocení provedení experimentu
- návrhy a doporučení na základě měření

2. Princip činnosti

Principem činnosti inerciálních systémů je využití klasické mechaniky, kterou definoval Isaac Newton.

1. Newtonův zákon definuje skutečnost, že pohybující se těleso setrvává v rovnoměrném přímočarém pohybu, pokud na něj nepůsobí vnější síly.
2. Newtonův zákon definuje skutečnost, že vnější síly působící na těleso, způsobují zrychlení, které je úměrné velikosti a směru výslednice daných sil.
3. Newtonův zákon definuje skutečnost, že každá akce způsobuje stejně velkou sílu (reakci), ale v opačném směru.

Činnost inerciálního systému je založena na principu využití druhého Newtonova zákona, který určuje závislost mezi silou F působící na těleso o hmotnosti m a jeho zrychlení a .

$$F = m * a$$

kde F je vektor síly působící na těleso

a je vektor zrychlení

m je hmotnost tělesa

Vektorová rovnice vyjadřuje průběh zrychlení ve směru působící síly. Zrychlení je možno měřit pomocí akcelerometrů, které se pohybují v dopravním prostředku. Z údajů akcelerometrů je možno první integrací zrychlení podle času vypočítat rychlost tělesa a následně druhou integrací podle času jeho dráhy.

První časová integrace $v = \int_{t_1}^{t_2} a \, dt$, kde v je vektor rychlosti

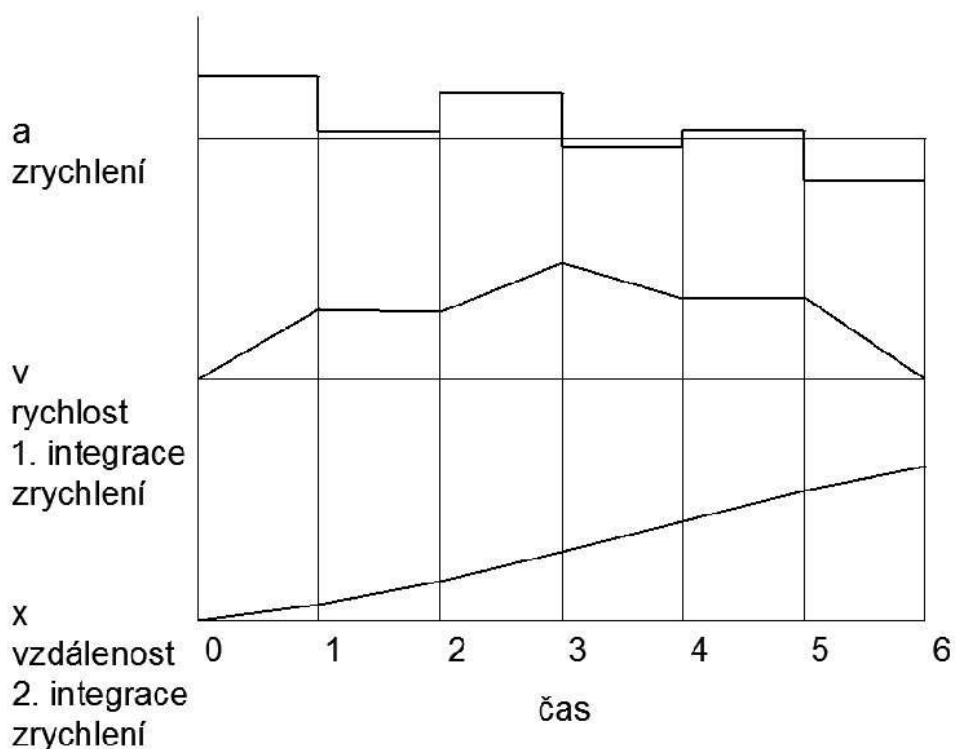
Druhá časová integrace zrychlení $x = \int_{t_1}^{t_2} v \, dt$, kde x je vektor dráhy

kde t_1, t_2 je časová hranice pro integraci

Vypočtením předchozích vztahů za podmínky $t_1 = 0$ a $t_2 = t$ získáme dráhu

$$x = \frac{1}{2} * a * t^2$$

Druhý Newtonův zákon definuje, že zrychlení (změna rychlosti za určitý čas) je přímo úměrné síle působící na dopravní prostředek. Rychlost a vzdálenost je vypočítána z naměřeného zrychlení podle shora uvedených vztahů. Průběh zrychlení, rychlosti a vektor dráhy je znázorněn na obrázku.



Obrázek 1 – Záznam průběhu zrychlení, rychlosti a vektoru dráhy

Změna rychlosti je po dobu existence zrychlení a je-li zrychlení nulové, rychlost zůstává konstantní.

3. Konstrukce inerciálních měřicích systémů

Princip inerciálního určení polohy spočívá v neustálém zpracovávání toku informací o pohybu objektu, tj. kontinuálním měřením vektoru okamžitého zrychlení. Informace potřebné na transformaci získáme z gyroskopických měření. V některých případech nevyžadují vysokou přesnost v určení souřadnic. Tyto relativně drahé a citlivé gyroskopy nahradíme snímači úhlového zrychlení.

Základem konstrukce inerciálního měřicího systému je měřicí plošina (platforma), na které je upevněná trojice navzájem kolmo orientovaných snímačů zrychlení a gyroskopy. Podle způsobu zavěšení (kardanový závěs, pevné spojení) a orientace plošiny v prostoru dělíme inerciální měřicí systémy na:

- systémy stabilizované vzhledem k terestrické souřadnicové soustavě;
- systémy stabilizované vzhledem ke geocentrické souřadnicové soustavě;
- strapdown systémy.

3.1. Systémy stabilizované vzhledem k terestrické souřadnicové soustavě

Plošina měřicího systému stabilizovaná vzhledem k terestrické souřadnicové soustavě je prostřednictvím servopohonů a gyroskopů orientovaná ve směru své prvotní orientace.

Svislá osa přístroje Z je souběžná se směrem místní těžnice na počáteční bod dráhy. Osa X je souběžná se směrem místního meridiánu na počátečním bodu polygonu. Třetí osa směřuje na východ, respektive na západ. Vektor zrychlení ${}^p a$ měřený v souřadnicové soustavě měřícího systému je shodný s vektorem ${}^l a$ měřeným v lokální souřadnicové soustavě. Měřením získáme vektor zrychlení, který je přímo použitelný na výpočet elipsoidických souřadnic a výšek.

$$B(t) = \int_t \frac{1}{M+h} * \left(\int_t {}^p a_x dt \right) dt + B_0$$

$$L(t) = \int_t \frac{1}{(N+h) \cos B} * \left(\int_t {}^p a_y dt \right) dt + L_0$$

$$h(t) = \int_t \left(\int_t {}^p a_x dt \right) dt + h_0$$

kde h – eliptická výška, M – meridiánový poloměr křivosti, N – příčný poloměr křivosti

3.2. Systémy stabilizované vzhledem ke geocentrické souřadnicové soustavě

Plošina měřících systémů se stabilizuje spuštěním procesu autoorientace. Osa ${}^p z$ stabilizovaného měřícího systému je orientovaná souběžně s osou rotací země, rovina ${}^p xy$ systému je rovnoběžná s rovinou rovníku a osa ${}^p y$ prochází místním poledníkem. Vektor zrychlení měřený systémem je transponovaný do terestrické souřadnicové soustavy použitím rotační matice.

$${}^l a = {}^l T * {}^p a$$

Nakolik je matice rotací funkcí dvou vektorů φ a φ_0 , je možné ji rozložit na dvě matice.

$${}^l T = T(\varphi) * T(\varphi_0)$$

Vektor φ_0 definuje vztah mezi souřadnicovou soustavou fiktivního měřícího systému stabilizovaného vzhledem k terestrické souřadnicové soustavě a souřadnicové soustavě měřícího systému stabilizovaného vzhledem ke geocentrické souřadnicové soustavě v okamžiku její autoorientace. Během měření se tyto parametry nemění.

3.3. Strapdown systémy

Měřící plošina strapdown měřících systémů je pevně spojená s nosnou konstrukcí měřícího systému a taktéž s nosičem. Svoji orientaci měří v přístroji podle pohybu samostatného měřícího systému. Snímače zrychlení jsou tak v plné míře vystavené rotacím a translaci vyplývajících z tohoto pohybu. Vektor okamžitého zrychlení měřený souřadnicové soustavě měřícího systému je transformovaný do terestrické souřadnicové soustavy prostřednictvím transformační matice ${}^l T$ skládající se ze třech dílčích rotačních matic

$${}^l a = T(\varphi) * T(\varphi_0) * T(\beta) * {}^p a$$

Matrice T (β) popisuje okamžitou orientaci měřicího systému v přístroji vůči fiktivnímu měřicímu systému stabilizované vzhledem ke geocentrické souřadnicové soustavě.

4. Vývoj inerciálních měřících systémů

Uživatelé inerciálních systémů vždy byli a nadále budou především výrobci a uživatelé navigačních systémů. Dějiny navigace sahají až do 1. století našeho letopočtu, kdy byl ve staré Číně vynalezen magnetický kompas. Spojením kompasu s měřením dráhy na principu otáčejícího se ozubeného kola (počítání otáček kola), byl vytvořený první navigační systém. Z tohoto období pochází i další zařízení „südweiser“, který vždy ukazoval na jih, bez ohledu na to, jakým směrem byl vychýlený¹.

I přesto, že zařízení nemělo žádné setrvačníky, respektive gyroskopy, rozhodně jej můžeme považovat za předchůdce dnešních snímačů směru.

Základy navigace tak byly položeny už před 2000 lety. Hlavní oblastí využívající tyto poznatky bylo určování polohy a mapování. Pozdější vývoj geodetických přístrojů a požadavky na přesnost vedly ke skutečnosti, že navigace jako mapovací metoda ztratila význam. Nové impulzy pro rozvoj této metody určování polohy přišly až ve dvacátých, resp. třicátých letech minulého století z oblasti námořnictva, kde se navigace stala jedním ze základních postupů pro určení polohy.

Myšlenku využít měření vektoru okamžitého zrychlení pro navigaci nacházíme v pracích a patentech J. M. Boykova, S. Reische, J. G. Gieversa. Výsledkem mnohaletého úsilí byl například Boykowomův popsaný „snímač dráhy“, ve kterém už nacházíme snímač zrychlení ve spojení s dvojitým integrátorem. Později zpracoval Boykow koncept dvousložkového měřicího systému orientovaného gyroskopy, který už obsahoval některé prvky důležité pro další vývoj inerciální měřící jednotky. I když se výsledky získané v daném čase zdály pro účely navigace nepoužitelné, byla myšlenka natolik atraktivní, že se jí vědci nadále zabývali.

První funkční inerciální měřící navigační systém postavil C. S. Draper, který přístroj odzkoušel při leteckém provozu v roce 1949. Přesnost tohoto systému, i přes několik rychle po sobě následujících zlepšení a úprav, dosahovala jen hodnot jedné námořní míle za hodinu (Nautical Mile per Hour - NMPH). Souběžně s pracemi C. S. Drapera pracovalo na vývoji inerciálního navigačního systému (Ship Inertial Navigation System - SINS) i vojenské námořnictvo USA, které realizovalo první několikadenní plavby ponorkami už v roce 1958.

První snahy využití inerciálních navigačních systémů v geodézii jsou přibližně čtyřicet let staré. Oficiálním sponzorem tohoto snažení byly Topografické laboratoře USA (U. S. Army Engineering Topographic Laboratories – USAETL), které financovaly vývoj systému na určení polohy azimutu (Position and Azimuth Determining System – PADS)² a od roku 1974 začala probíhat jeho sériová výroba. Až do roku 1975 se jednalo o produkci realizovanou v relativně malých sériích, při kterých byl prototyp systému neustále vylepšován. Skutečnou sériovou výrobu inerciálních měřících systémů začala firma až v roce 1975 typem LASS-I. Přibližně ve stejném roce začaly se sériovou výrobou

i firmy Honeywell (GEO-SPIN) a Ferranti (FILS). Všechny tři uvedené systémy byly široké veřejnosti představeny na sympóziu v Ottawě (The First International Symposium on Inertial Technology for Surveying and Geodesy) v roce 1977.

V posledních letech pracují výrobci na vývoji systémů, ve kterých jsou zrychlení i rotace měřeny jedním snímačem. Tyto systémy jsou sice méně přesné, ale jsou podstatně levnější. Vyrobené prototypy těchto systémů využívají na určení rotace Coriolisovu sílu, resp. Coriolisovo zrychlení, které je přímo úměrné změně směru objektu pohybujícího se na rotujícím tělese. Oddělení těchto složek zrychlení od celkového zrychlení registrovaného snímači se děje synchronní modulací.

Trendy ve vývoji inerciálních měřicích systémů jsou vymezeny vývojem výrobních technologií v oblasti výroby gyroskopů a snímačů zrychlení. Snímače využívané v inerciálních systémech jsou vystaveny neustálému a relativně velkému dynamickému zatížení, důsledkem kterého nejsou jejich vlastnosti (charakteristiky) stálé, ale mění se s časem. Gyroskopy využívané na stavbu inerciálních měřicích systémů musí splňovat kritéria:

- střední chyba v určení směru $m_\phi \leq 0,01^\circ/\text{h}$;
- rozptyl opakovaných měření jednoho směru $\delta_\phi \leq 0,002^\circ/\text{h}$;
- přesnost určení měřítkového faktoru má být alespoň 50 ppm.

Uvedené charakteristiky se zdají být na první pohled lehce splnitelné, ale při neustálém dynamickém zatížení těchto snímačů jejich splnění vyžaduje značné úsilí konstruktérů a precizní výrobu. Ze široké škály v současnosti vyráběných mechanických gyroskopů jsou schopné uvedené požadavky alespoň z části splnit dynamicky laděné gyroskopy (Dynamic Tuned Rotor Gyroscope – DTG), gyroskopy s rotorem zavěšeným v elektrickém poli (Electrostatically Suspended Gyroscope – ESG) a gyroskopy s rotorem uloženým ve vzduchovém polštáři (Air-bearing Floated Gyroscope – AFG). Na počátku 80. let 20. století se do výroby prototypů dostala technologie mechanických rezonančních gyroskopů (Hemispherical Resonator Gyroscope – HRG), které se vyznačují dobrou stabilitou a odolností vůči dynamickým zatížením.

Podstatně účinnější miniaturizaci gyroskopů umožňuje technologie optických gyroskopů pracujících na principu známém Sagnacovo efekt. V současnosti vyráběné laserové prstencové gyroskopy (Ring Laser Gyroscope – RLG) používají jako zdroj koherentního záření He–Ne plynový laser umístěný mimo blok prstence. Zdokonalením výroby optických vláken vzniká možnost výroby laserových gyroskopů na bázi optických vláken s interferenčním snímáním (Interferometric Fiber-Optic Gyroscope – IFOG).

Použití optických vláken umožňuje mnohonásobně prodloužit dráhu světelných paprsků a tak zvýšit rozlišovací schopnost a přesnost laserových gyroskopů. Vedle mnoha výhod mají laserové gyroskopy i několik nevýhod. Značnou nevýhodou je, že při měření pomalých rotací dochází k velmi malým fázovým posunům, jejichž dostatečně přesné měření způsobuje ještě stále nesmírné problémy. Úhlové rychlosti menší než $0,2 \text{ }^\circ/\text{s}$ dokonce způsobují zablokování gyroskopů, tzv. lock in efekt³. Úplně

odstranění těchto jevů u laserových gyroskopů technicky není možné. Gyroskopy se snížením jeho vlivu mají označení „Zero-Lock Laser Gyro – ZLG“.

V oblasti výroby snímačů zrychlení docházelo k prudkému rozvoji už během druhé světové války. Z několika souběžně se vyvíjející koncepcí se nakonec prosadila koncepce kyvadlově-setrvačnickových snímačů zrychlení (Pendulous Integrating Gyroscope Accelerometer – PIGA). Při stavbě velmi přesných, spolehlivých, ale i cenově náročných inerciálních měřících systémů se využívá tzv. impulzně-kyvadlové snímače zrychlení (Pulsed Integrating Pendulos Accelerometer – PIPA).

Požadavky miniaturizace snímačů se stala v posledních letech rozhodujícím faktorem v oblasti vývoje a výroby snímačů zrychlení. V posledním období se úspěšně zavádějí do výroby technologie křemíkových rezonančních snímačů zrychlení, snímače zrychlení se seizmickým tělesem zavěšeným v elektrickém poli. Na univerzitě v Marylande byl vyroben prototyp snímače zrychlení ze supervodivých materiálů. Změna polohy seizmického tělesa je detekovaná senzorem pracujícím na principu Meissnerova efektu. Předmětné technologie umožňují dosáhnouti rozlišovací schopnosti na úrovni 10^{-8} až $10^{-12}g$.⁴

Nárůst počtu výrobců a různých typů inerciálních měřících systémů stanovil v posledních letech jejich rozvoj. Měřící systémy zařazené do jednotlivých tříd se nevyznačují jen rozdílnými charakteristikami a užitnými vlastnostmi, ale je patrný i rozdíl v jejich dalším směřování a vývoji. Nejčastěji používaným kritériem při kvalifikaci měřících systémů nadále zůstává přesnost, podle které je dělíme na systémy:

- standardní přesnosti;
- střední přesnosti;
- vysoké přesnosti.

4.1. Standardní inerciální měřící systémy

V oblasti standardních inerciálních měřících systémů se očekává miniaturizace používaných snímačů zrychlení a využití interferometrických gyroskopů vyráběných na bázi optických vláken (Interferometric Fiber Optic Gyro – IFOG). Vývoj směřuje k nabídce tvořené výlučně strapdown měřícími systémy. Využití nacházejí tyto systémy jak v oblasti rektifikace strojírenských zařízení, tak i v dálkovém řízení vozidel, při určení geometrie ropovodů a plynovodů, při stavbě tunelů apod.

4.2. Inerciální měřící systémy střední přesnosti

Z hlediska přesnosti jsou pro geodety zajímavé inerciální měřící systémy střední přesnosti, které jsou navíc cenově dostupné. Mnohé z těchto systémů jsou vybaveny integrovanou aparaturou GPS pracující v diferenciálním módu. Ve střední třídě přesnosti se objevují vedle strapdown systémů také stabilizované, inerciální měřící systémy.

4.3. Inerciální měřicí systémy vysoké přesnosti

V třídě vysocepřesných inerciálních měřicích systémů dominují stabilizované měřicí systémy. Namísto laserových gyroskopů se do těchto systémů osazují gyroskopy typu ZLG vyznačující se lepšími dynamickými charakteristikami. Snímače zrychlení jsou plně miniaturizované, vyráběné silikonovou mikročipovou technologií. Pracují na principu fyzikálního kyvadla udržovaného v rovnovážném stavu kompenzačním obvodem. Tyto systémy nacházejí využití zejména v oblasti přesné navigace (řízené střely, mezikontinentální rakety, strategická letadla apod.) Dosahují přesnosti v určení polohy 5 až 10 ppm.

5. Přístroje pro měření rovnosti povrchu vozovek

Při přejímání vozovek i při následných kontrolách rovnosti povrchu komunikací investorem, se používá u nás i v zahraničí velké množství nejrozmanitějších metod, přístrojů a zařízení.

Podle jejich funkčního principu je lze rozdělit do tří základních skupin:

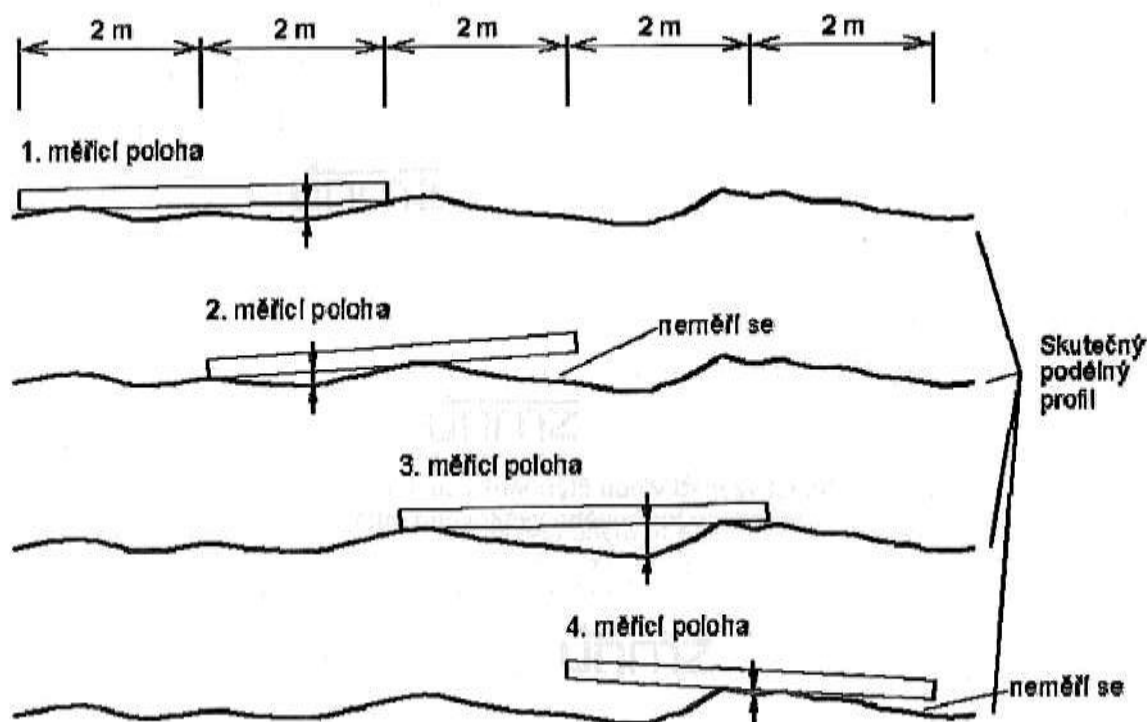
- **Přístroje pro přímé měření rovnosti povrchu vozovky** – příložné latě 2 až 4 metry dlouhé, různé pohyblivé latě nebo přístroje zaznamenávající graficky profil vozovky.
- **Přístroje pro nepřímé měření rovností povrchu vozovky** – neměří se přímo rovnost povrchu vozovky, ale účinky nerovností na pohybující se automobil, popř. na cestující.
- **Přístroje pro bezkontaktní měření rovnosti povrchu vozovky** – založené na principu vysílání ultrazvukových, laserových vln na povrch vozovky z jedoucího vozidla a jejich zpětného přijímání po odrazu.

5.1. Přístroj pro přímé měření rovnosti vozovek

5.1.1. Příložné latě

Jako příklad přímého měření rovnosti vozovek uvádím měření pomocí příložné latě. Nejjednodušší a nejstarší způsob měření rovnosti povrchu vozovky je měření rovnou, tuhou, příložní latí (duralová lat' o délce 2000 mm nebo 4000 mm). Vznikla z profilové latě, spodní hrana ve tvaru příčného řezu vozovky, používané v době ručního rozprostírání jednotlivých vrstev šterkové vozovky. Prověřovala se s ní kvalita povrchu vrstev a krytu v příčném řezu. Dnes se používají mechanizace, povrch konstrukčních vrstev se dělá v předepsané rovnosti, takže stačí povrch kontrolovat přímo příložnou latí, nikoliv latí profilovou. Příložná lat' se stala tradičním kontrolním nástrojem rovnosti

povrchu vozovek.



Obrázek 2 – Postup měření nerovností příložnou lať. Zdroj: ČSN 73 6175

Lať se položí ve směru měření (v příčném nebo podélném směru) a měřícím klínem se měří hloubka prohlubní pod spodní hranou latě, která tvoří základní osu, od níž se nerovnost měří. Měřící osu tvoří tedy spojnice dvou nejvyšších bodů povrchu vozovky, na kterých lať leží. Nerovnosti vozovky se zachytí jen na délku měření základny, která je zpravidla kratší než samotná délka měřící latě. Toto je určitá nevýhoda, zejména při měření nerovnosti povrchu vozovky v podélném směru.

5.1.2. Československý stabilní nosíkový profilograf VUT

V roce 1969 v rámci výzkumného úkolu sledování změn rovnosti vozovek profilografem byl na katedře dopravních staveb VUT v Brně pod vedením prof. Ing. Veselého zkonstruován profilograf, který dle funkčních principů patří do skupiny stabilních nosíkových profilografů.

Referenčním nosíkem je ocelová trouba průměru 100 milimetrů a délky 5 metrů s měřící základnou dlouhou 4 metry. Po nosníku pojíždí snímač povrchu vozovky, který se v konečné úpravě skládá ze snímacího kola mezi dvěma posuvnými tyčemi s přímým přenosem vertikálního posunu pomocí ocelové struny, vedené přes tři kladky a s upevněným zapisovacím zařízením. U nosníku je nasazen otočný buben o obvodu 40 centimetrů, na kterém je navinut milimetrový papír pro zápis mikroprofilu povrchu vozovky. Buben se pomocí převodů otočí jednou při posunu válce o 4 metry, zápis délek je v měřítku 1:10.

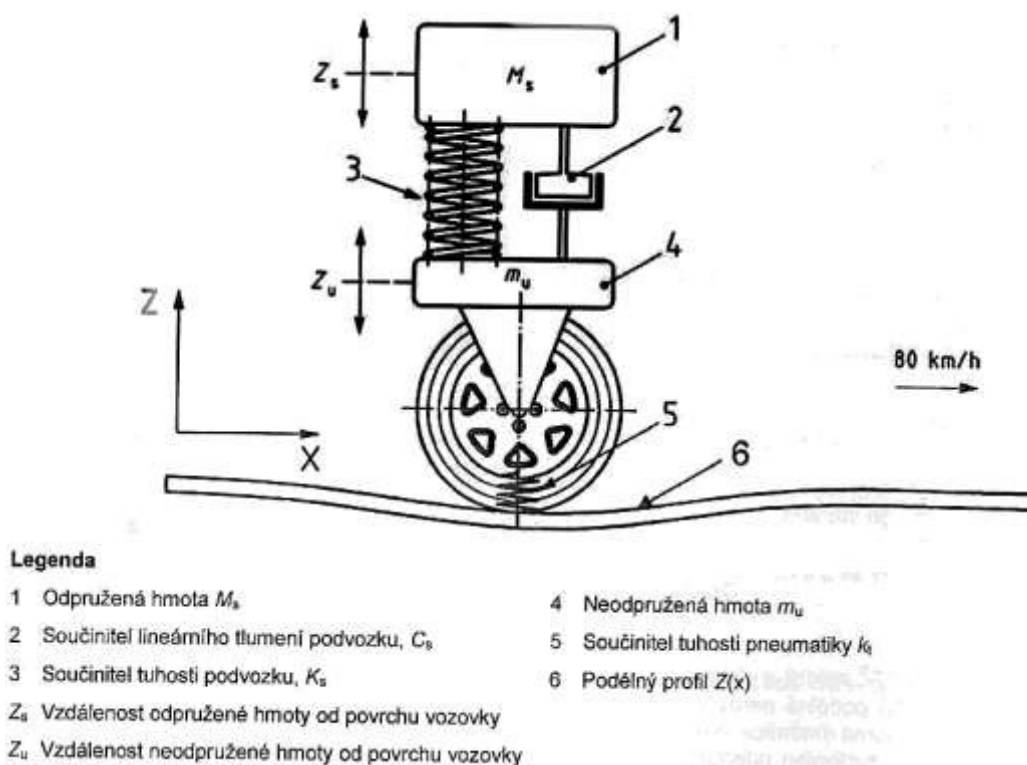
Nosník, který je pro vyloučení vlastního průhybu předpjatý, je instalován na dvou čtyřkolových podvozcích, proto se musí ručně posunout na další stanoviště měření.

Pro polohování nosníku bylo použito svahoměrné zařízení, adaptované z teodolitu kvůli tomu, že v podélném směru je nutno měřit nosníkem v šikmé poloze. Uvedeným profilografem bylo dosaženo přesnosti nutné pro dlouhodobá, několikrát opakovaná měření. Nevýhodou zůstává určitá pracnost a časová náročnost pro změření čtyř metrů profilu. Je proto spíše vhodný pro přesné sledování změn silničního profilu omezené délky.

5.2. Přístroje pro nepřímé měření rovností povrchu vozovky

5.2.1. Měření podélné nerovnosti povrchu vozovky profilometrem s dvoumotovým odezovým systémem

Cílem této zkoušky je změření podélné nerovnosti povrchu vozovky a následné stanovení a vyhodnocení mezinárodního indexu IRI. Podstata zkoušky spočívá ve snímání hodnot svislého zrychlení neodpružené měřící nápravy a hodnot svislého zrychlení odpružené hmoty karoserie vozovky, ze kterých se nezávisle na rychlosti pohybu měřícího zařízení stanoví průběh podélné nerovnosti vyjádřený mezinárodním indexem nerovnosti.



Obrázek 3 – Dvoumotový referenční odezový systém. Zdroj: ČSN 73 6175

Profilometr s dvoumotovým odezovým systémem je tvořen jednokolovým závěsem s měřícím kolem rovnoběžným se směrem pojezdu upevněným na nosné vozidlo.

Nosné vozidlo profilometru musí vyhovovat těmto základním konstrukčním požadavkům:

- zajišťovat dostatečnou pasivní bezpečnost posádky;
- mít dostatečný výkon zajišťující maximální měřící rychlost 90 km/h;

- být vybaveno soustavou snímačů zrychlení měřících složku svislého zrychlení odpružené hmoty karoserie a neodpružené hmoty měřící nápravy;
- být vybaveno počítačem s algoritmem pro výpočet mezinárodního indexu IRI;
- mít zařízení pro měření délek.

Rychlost jízdy profilometru po měřeném úseku nemusí být konstantní, ale v rozmezí 35 km/h až do 90 km/h. Při maximální měřící rychlosti jsou profilometrem měřeny nerovnosti o vlnových délkách v rozmezí 0,5 až 90 metrů.

5.2.2. Československý profilograf VVSL – ČVUT

Československý profilograf VVSL – ČVUT je jednostopé vlečné měřící zařízení z roku 1969, slouží k rychlému zaznamenání nerovností povrchu vozovek v podélném směru. Skládá se z tuhého, lehkého kolečka dotýkajícího se vozovky, z velmi měkce uložené odpružené hmoty, dále ze snímačů a z měřící aparatury umístěné v tažném automobilu.

Za jízdy po vozovce se zapisuje průběh vzdáleností mezi kmitající odpruženou hmotou, jejíž osa kmitání tvoří referenční rovinu, a kolečkem. Elektrický signál se koriguje, tím se získává graf podélného profilu silniční nerovnosti. Příhradový nosník je vpředu kloubově spojen s tažným vozidlem a spolu se závažím umístěným na druhém konci tvoří odpruženou hmotu. Bod závěsu je ve značné vzdálenosti od hlavní části odpružené hmoty, aby nepříznivý vliv svislých pohybů a otřesů tažného vozu, projevující se na vlečném profilografu nežádoucím úhlovým kmitáním, byl omezen na nejmenší míru. Požadavky na kolečko (nízká váha a zároveň velká přitlačná síla k vozovce) mají zajistit, že kolečko bude spolehlivě (bez odskakování) sledovat povrch vozovky i při vysoké rychlosti jízdy. Zajišťuje to pět pružin, které musí být zároveň velmi měkké, aby vlastní kmity mechanické části byly v požadovaném rozmezí. Mezi dotykové kolečko a příhradový nosník se upevňují potřebné snímače a teleskopické hydraulické tlumiče.

Průběh dějů se zapisuje na fotografický pás čtrnáctismyčkového oscilografu, při kterém se ještě vždy zaznamenával sekundovými intervaly i průběh času. Měření byla prováděna při různých rychlostech: 18 km/h, 36 km/h a 72 km/h a při různých kombinacích parametrů profilografu s tlumením, bez tlumení. Záznamy zachycují průběh vzdáleností profilu vozovky od polohy kmitající odpružené hmoty. Odečtením kmitů odpružené hmoty lze získat obraz skutečného profilu vozovky.

Profilografem VVSL – ČVUT/1969 lze tedy, na rozdíl od jiných podobných přístrojů z dané doby použitelných jen k jednoduchému posuzování nerovností podle nekorigovaného průběhu zdvihů odpružené hmoty, pořizovat také hromadně a rychle v jistém měřítku záznamů skutečné tvary nerovností povrchu komunikací.⁵

5.3. Přístroje založené na bezkontaktním měření rovnosti povrchu komunikací

5.3.1. Multifunkční zařízení ARAN

Toto multifunkční zařízení je schopno měřit podélné nerovnosti, příčné nerovnosti, makrotexturu povrchu vozovky. Vyhodnotit v reálném čase naměřené hodnoty a ukládat je na záznamové medium.

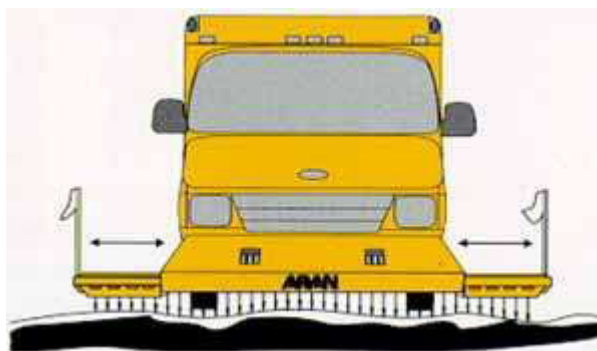
Měření podélných nerovností je založeno na bezkontaktním snímání hodnot svislého zrychlení neodpružené hmoty měřicí nápravy a hodnot svislého zrychlení odpružené hmoty karoserie. Nejmodernější metody jsou použity pro snímání hodnot potřebných pro výpočet IRI. Výsledkem je přesnější hodnota IRI, která se blíží výpočtu ze skutečného profilu měřeného klasickou geodetickou metodou.

Měření příčného profilu je uskutečňováno pomocí ultrazvukových senzorů, které jsou pevně připevněny k přední liště diagnostického vozidla. V reálném čase jsou vypočteny v kombinaci s gyroskopy a měřením vzdálenosti proměnné parametry povrchu vozovky, jako jsou například hloubka a typ vyjeté koleje, teoretická hloubka vody ve vyjetých kolejích a příčný sklon vozovky.

Měření makrotextury je založeno na principu opakovaného snímání vzorků profilu. Snímá se pomocí laserového optokátoru švédské firmy SELCOM. Systém je montován na pravou nebo levou stopu kol, ve kterých jsou hodnoty kritické. Probíhá pomocí vysokorychlostních laserů, které měří průměrnou hloubku textury a makrotexturový profil vzorků o délce 20 cm.⁶



Obrázek 4 – vozidlo proměření podélných nerovností.
Zdroj: http://www.viageos.cz/tech_udaje.asp



Obrázek 5 – vozidlo proměření podélných nerovností.
Zdroj: http://www.viageos.cz/tech_udaje.asp

6. Měřicí zařízení

6.1. ADIS16400 iSensor ®

ADIS16400 iSensor ® je kompletní inerciální systém, který zahrnuje triaxiální gyroskop, triaxiální akcelerometr a triaxiální magnetometr. Zařízení kombinuje špičkovou technologii MEMS s úpravou signálu, který optimalizuje dynamický výkon. Výrobní kalibrace charakterizuje každý senzor pro citlivost, zkreslení, zarovnání a lineární zrychlení. V důsledku toho má každý senzor vlastní dynamickou kompenzaci na opravu vzorce, které poskytují přesné měření v teplotním rozsahu od -40 °C až +85 °C.

Měřicí zařízení poskytuje jednoduchou, efektivní metodu pro snímání. Tento kompaktní modul má rozměr přibližně krychle o velikosti hrany 23 milimetrů a poskytuje flexibilní konektor rozhraní, který umožňuje více možností orientace montáže. Cena tohoto zařízení se pohybuje kolem částky 8 300 Kč⁷.

Funkce:

- triaxiální digitální gyroskop s rozsahem škálování $\pm 75^\circ / s$, $\pm 150^\circ / s$, $\pm 300^\circ / s$ dle našeho nastavení;
- triaxiální digitální akcelerometr s rozsahem $\pm 18g$;
- triaxiální digitální magnetometr s rozsahem $\pm 2,5$ Gauss;
- autonomní provoz a sběr dat, nejsou nutné žádné externí konfigurační příkazy.

6.2. Akcelerometr

MEMS akcelerometry, které jsou použity v ADIS 16400 i Sensor, patří mezi kapacitní akcelerometry. Jsou velmi citlivé a přesné, ale vhodné pro nízké dynamické rozsahy zrychlení.



Obrázek 6 – zařízení ANALOG DEVICES ADIS 16400BMLZ



Obrázek 7 – zařízení ADISUSBZ

Při pohybu seismické hmotnosti se jedna kapacita zvětšuje a druhá naopak zmenšuje. Vyhodnocuje se difference hodnot kapacit. Základem uspořádání založeném na MEMS (Mikroelektromechanické systémy) technologii je monokrystalický substrát, na kterém je z polykrystalického křemíku na dvou pružných upevněních zavěšena seismická hmota m ve tvaru hřebínku. Každý z padesáti zubů hřebínku představuje střední pohyblivou elektrodu X soustavy diferenčních kapacitních senzorů s proměnnou vzduchovou mezerou a pevnými elektrodami Y , Z . Výstupní napětí z demodulátoru SD je přivedeno zpětnou vazbou na elektrodu X , čímž je vyvolán elektrostatický silový účinek kompenzující působení měřeného zrychlení. Parametry MEMS akcelerometru použitého v ADIS 16400 i Senzor: dynamický rozsah ± 18 g, teplotní rozsah od 0 °C do 85 °C.⁸

6.3. Gyroskop

Gyroskopy jsou senzory měřící úhlové rotace kolem zadaného směru vzhledem k inerciálnímu vztažnému systému. Rotace je tedy měřena vzhledem k inerciálnímu vztažnému systému a ne k laboratornímu nebo nějakému obecnému vztažnému systému. Jsou používány k inerciální navigaci, výpočtové navigaci, k detekci směru, k vytvoření umělého horizontu apod.

Gyroskopy dělíme na tři skupiny – gyroskopy s rotující hmotou, vibrační gyroskopy a optické gyroskopy.

- Gyroskop s rotující hmotou je založen na vlastnostech těžkého mechanického setrvačnicku. Tyto gyroskopy, ač velmi přesné, jsou obvykle těžké a špatně se miniaturizují. Jejich nevýhodou je dlouhá doba uvedení do měřícího stavu, relativně krátká doba života v důsledku opotřebení mechanických částí, rozměrnost a energetická spotřeba.
- Vibrační gyroskopy jsou založeny na účincích Coriolisovy síly, která indukuje vazbu mezi dvěma mechanickými rezonátory. Na tomto základě jsou založeny MEMS. Tyto gyroskopy, ačkoliv nevynikají zvláštní přesností, jsou snadno miniaturizovatelné a v porovnání s ostatními gyroskopy jsou levné.
- Optické jevy jsou založeny na Sagnacově jevu.

Vedle těchto typů gyroskopů, které jsou komerčně dostupné, se rozvíjí technologie založené na nukleární magnetické rezonanci, na atomových interferometrech a také na supratekutosti. Tyto technologie jsou zatím dostupné pouze ve specializovaných laboratořích.⁹

6.4. ADISUSBZ

ADISUSBZ je PC-USB systém hodnocení, který umožňuje základní výstupy z mnoha senzorů včetně ADIS 16400. Tento výrobek se prodává samostatně za cenu přibližně 5 200 Kč. Poskytuje dva milimetry velké otvory pro snadné připevnění všech senzorů.

Po nainstalování programu Analog Devices – AdIS 16405 Evaluation Software – Rev 3 do měřicího počítače, propojení ADISUSBZ a ADIS 16400, propojení počítače a ADISUSBZ pomocí USB kabelu můžeme získávat data ze senzorů na vyžádání prostřednictvím programu¹⁰.

6.5. Program Analog Devices – AdIS 16405 Evaluation Software – Rev 3

Po zapnutí programu AdIS 16405 a připojení inerciální měřicí jednotky přes USB rozhraní k PC si musíme v záložce Interface (rozhraní) nastavit rozhraní USB. Po úspěšném připojení jednotky se nám ve Status register (status zařízení) zobrazí u všech položek OK se zeleným podbarvením, v případě červeného podbarvení nastal u dané položky problém a musí se řešit. V mém případě jsem měl problém jen s Power Supply Low (zdrojem napájení nízkého napětí), kde se mi občas zobrazilo červené podbarvení, ale po odpojení a následném připojení bylo vše v pořádku.

Další nastavení směřuje k záložce Device (zařízení) kde si vybereme mezi AdIS16400 (používaný v mém případě) a AdIS16405. Dokončili jsme základní nastavení a můžeme si vybrat, pro které veličiny chceme zobrazovat grafy, zaškrtneme záložku Loop (smyčka), poté klikneme na Read (číst) a zobrazují se nám grafické výstupy měřicího programu přímo v zařízení.

Pro výstup dat do souboru vybereme v záložkách Datalog (záznam dat), zobrazí se nám okno s nastavením. V části nastavení souboru zvolíme kolik měření se má provést během jednoho měření a kolik vteřin se má měřit. Při nastavení 1000 měření a 10-ti sekund, nám jednotka předává vyhodnocení 100x za jednu sekundu. Jedeme-li rovnoměrnou rychlostí 30 km/h, ujedeme za jednu sekundu 8,3 metru a jednotka nám snímá povrch každých 8.3 centimetru.

V části informace souboru zvolíme, do jaké složky se má záznam dat uložit a pod jakým názvem. Poslední a nejdůležitější část záznamu měření je výběr dat, můžeme měřit pohyb gyroskopu ve třech osách, zrychlení akcelerometru ve třech osách, magnetismus a teplotu. Po spuštění záznamu se nám po dobu měření zobrazuje blikající nápis DATALOG IN PROGRESS (záznam dat probíhá).

Záznam měření se nám uloží do souboru poznámkového bloku. Soubor obsahuje název souboru, datum, čas, začátek měření a konec měření v sekundách, pak samotný záznam měření. Většinu mých měření jsem nastavil na dobu 10 sekund, ale v záznamu po odečtení času začátku a konce měření jsem dostal rozdíl okolo hodnoty 11,5 sekund. Toto zpoždění měření můžeme zdůvodnit nastavením většího množství zaznamenávaných dat, celkem až dvanácti možných, které způsobí zahlcení měřicí jednotky a programu daty, které nestačí v daném čase zpracovat.

7. Návrh a provedení experimentu

7.1. Připevnění IMU a její vyrovnání

Z důvodu absence univerzálního držáku pro ADISUSBZ jsem měřicí zařízení připevnil na



Obrázek 8 – Připevnění IMU na palubní desce

vodorovnou část palubní desky pomocí oboustranné lepicí pásky. Vodorovnost palubní desky byla zkontrolována malou vodováhou. Automobil byl zaparkován při instalaci zařízení v garáži s rovnou podlahou, pro mé měření toto vyrovnání považuji za dostatečné. Zařízení při jízdě mimo vodorovnou rovinu svírá s vertikální osou úhel, který nám zkresluje měření. Odchýlení osy Z od svislé osy se pohybuje přibližně do 5°.

7.2. Kontrola připojení IMU a podmínky při měření

Po propojení ADISUSBZ pomocí USB kabelu s přenosným počítačem, jsem spustil program ADiS 16405, kontrola proběhla v pořádku a mohl jsem provést samotná měření.

Experiment byl proveden 1. 4. 2014 od 13:00 do 16:00, průměrná denní teplota byla 9 °C, polojasno. Vozidlo, ve kterém proběhla veškerá měření je Fiat Marea Weekend. Po dobu měření byly ve vozidle dvě osoby (řidič a obsluha měřící jednotky). Jízdní stopa pravého kola byla zvolena podle normy ČSN 73 6175 0,8 až 1,2 metru od okraje jízdního pruhu.

7.3. Zkoumané vozovky

Pro lepší představu jednotlivých vibrací automobilu (zrychlení v ose Z, tato osa je svislá) jsem vybral rozdílné povrchy jako např. silnice II/129, místní komunikace ze žulových kostek, panelová vozovka a místní komunikace.

U těchto rozdílných povrchů vozovek bychom měli vidět rozdíly v řádu desetin v hodnotách zrychlení a i v grafech amplitudové frekvenční analýzy. Po FFT zrychlení v ose Z na místní komunikaci ze žulových kostek by pro nás měli být významné frekvence, které po přepočtení na délku odpovídají hodnotám 18 až 20 cm. Takto velké jsou jednotlivé žulové kostky.

Hodnoty zrychlení u silnice II/129 budou nejnižší ze všech měřených povrchů. Zrychlení by nemělo mít žádné velké rozptyly a žádná frekvence by neměla být natolik významná.

Hodnoty zrychlení u panelové vozovky v záplavové oblasti budou mít svá maxima v místech spár mezi jednotlivými panely a i hodnoty frekvencí budou významné v těchto místech.

Místní komunikace bude mít významné větší množství frekvencí, které vypovídají o celkově větší nerovnosti celé komunikace.

8. Úvod do způsobů vyhodnocení naměřených dat

Kmitání (vibrace, chvění) je ukazatelem stavu zkoumaného předmětu. Mimo naše zkoumané vlastnosti vozovek jde o ukazatele namáhání technického stavu stroje a jeho funkcí, týká se to zejména ložisek, vřelí rotačních součástí, klikových ústrojí. Tato skutečnost je masivně používána pro monitorování a diagnostiku.

Nejjednodušší formou je realizace širokopásmových měření celkových úrovní vibrací. Většinou v definovaném rozsahu podle platných norem, či doporučení výrobců pro dané zařízení. Více informací můžeme získat pomocí kmitočtové analýzy. Zde se využívají složitější metodiky a přístrojové vybavení pro získání charakteristického kmitočtového spektra vibrací.

8.1. Kvantitativní hodnocení vibrací v časové oblasti

V praxi se používají následující metodiky pro hodnocení amplitud vibrací v časové oblasti, které přímo odhalují škodlivost a v některých případech i nebezpečnosti vibrací.

V časové oblasti se obvykle jedná o:

- Vrcholovou hodnotu (Peak Level – X_{peak}), která udává maximální amplitudu a obvykle se využívá pro popis mechanických rázů, resp. dalších relativně krátkodobých jevů. X_{peak} však pouze indikuje přítomnost špičky, ale nenesou informaci o časovém průběhu ani o kmitočtovém složení hodnocených vibrací.
- Maximální rozkmit (peak to peak – $X_{\text{peak-to-peak}}$), tzv. dvojitá amplituda, která se využívá pro posouzení maximálně přípustného mechanického namáhání.

- Střední hodnota (Average Level – Xrectified average), která popisuje časový průběh sledovaných vibrací – tato hodnota má omezený význam, protože nepopisuje žádné důležité fyzikální procesy.
- Efektivní hodnota (Root Mean Square – XRMS), je často užívanou hodnotou, protože nese informace o časovém průběhu vibrací a je v přímém vztahu k energetickému obsahu měřených vibrací.
- Crest factor, který definuje poměr mezi vrcholovou a efektivní hodnotou. Pro harmonické kmitání (sinusový průběh) je Crest Factor roven odmocnině ze dvou. Pro náhodné signály Crest Factor roste v souvislosti s nerovnostmi, výmoly, trhlinami aj. což se v diagnostice s výhodou využívá.

Jako určujících veličin se harmonického kmitání se používá nejčastěji efektivních hodnot výchylky, rychlosti a zrychlení s_{ef} , v_{ed} , a_{ef} . Dále se používá amplitud výchylky s_0 , rychlosti v_0 a zrychlení a_0 , resp. jejich absolutní hodnoty.

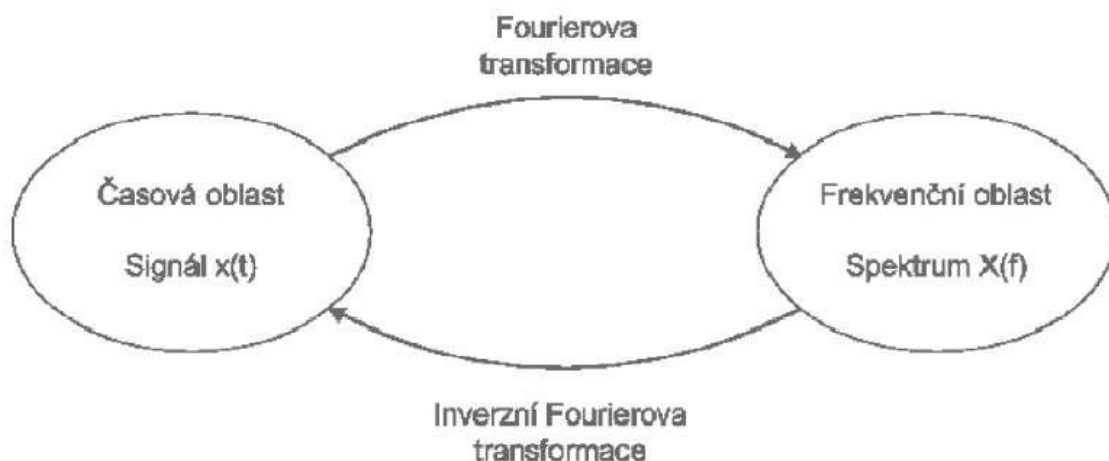
8.2. Kmitočtová analýza

Časový průběh kmitání je výhodné transformovat do frekvenční oblasti, tj. vibrace nahradit posloupností jeho kmitočtových složek. Vhodnou představu o účelnosti kmitočtové analýzy získáme, když si uvědomíme rozdíl mezi informací obsaženou v časovém signálu a kmitočtovém spektru. Lze říci, že časový signál obsahuje informaci o tom, kdy se daný jev stal, ale kmitočtové spektrum obsahuje informaci o tom, jak často se tentýž jev objevuje ve sledovaném signálu. Operace, která komplexní signály rozkládá na jejich kmitočtové složky, se nazývá kmitočtovou analýzou, která využívá buď selektivních pásmových propustí (analogově nebo digitálně) nebo častěji rychlou Fourierovu transformaci (FFT).

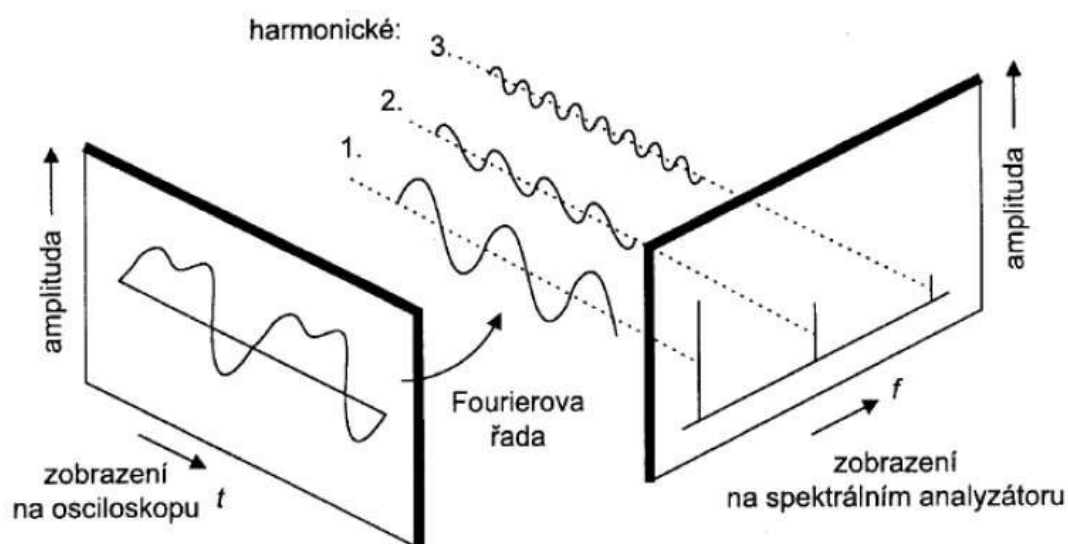
8.3. Fourierova transformace

Fourierova transformace je ideální nástroj pro zpracování signálu. Převádí signál z časové oblasti do frekvenční oblasti. Pro některé signály je vhodnější je prezentovat v časové oblasti, jiné naproti tomu ve frekvenční oblasti jako frekvenční spektra, protože nám ukazují zřetelnější informaci o složení

signálu.



Obrázek 9 – Převod popisu signálu mezi časovou a frekvenční oblastí



Obrázek 10 – Odlišnost náhledu na tentýž signál

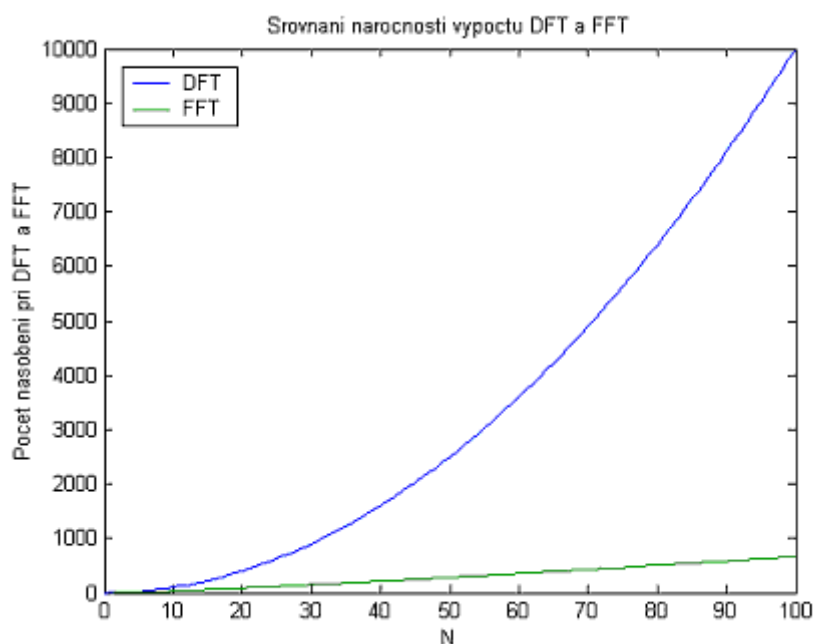
Východiskem Fourierovy transformace je rozklad časových průběhů na elementární harmonické průběhy. Jinak řečeno je signál rozčleněn na jednotlivé složky, těmito složkami jsou harmonické funkce.

Praktické použití diskrétní Fourierovy transformace je poměrně výpočetně náročné, proto byly vytvořeny rychlé výpočetní algoritmy, které snižují pracnost a celkový počet operací. Tyto algoritmy jsou známy už od počátku století, ale nebylo pro ně praktické využití. Jedním z těchto algoritmů je algoritmus rychlé Fourierovy transformace (FFT) podle Cooleho-Tuckeyho (1965). Tento algoritmus provádí výpočet transformace s počtem vzorků, které jsou rovny mocninám čísla dva.

8.3.1. Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Rychlá Fourierova transformace (FFT) je speciální postup diskrétní Fourierovy transformace, která zpracovává vzorkovaná data s neměnným časovým krokem. Princip FFT je složitý, naopak použití je nenáročné.

Rychlá Fourierova transformace se používá k převodu z časové do frekvenční oblasti, naopak inverzní (zpětná) Fourierova transformace (IFFT) slouží k opačnému převodu. Jde o rychlou verzi diskrétní Fourierovy transformace (DFT), FFT je doménou PC.



Obrázek 11 – Srovnání náročnosti výpočtu DFT a FFT

Algoritmus snižuje celkový počet komplexních součinitelů na počet $(N \cdot \log_2 N)$. Počet součinitelů se tedy snižuje v poměru $N/\log_2 N$ a toto snížení se zvyšuje s rostoucí hodnotou N . Tato redukce se kladně projeví zkrácením doby potřebné pro výpočet, ale také zmenšením zaokrouhlovacích chyb (zaokrouhlování výsledků násobení). Největší účinnosti výpočtu se dosáhne, zvolí-li se počáteční celkový počet vzorků $N = 2^n$. Parametr, který je označován jako počet bodů FFT, je jedním z nejdůležitějších, který je potřeba zvolit před výpočtem FFT.¹¹

9. Výsledky

9.1. Zpracování výsledků

Před vyhodnocením je potřeba naměřená data zpracovat. Program AdiS 16405 uložil záznam měření do poznámkového bloku, v něm je záznam o názvu měřené komunikace, času měření a zrychlení v daném intervalu. Pro zpracování výsledků jsem si zvolil program Microsoft Excel 2007, ve kterém jsem zpracoval naměřená data a vytvořil grafy. Postup práce v programu Microsoft Excel je popsán v následujících kapitolách.

9.1.1. Kvantitativní hodnocení v časové oblasti

V kvantitativní oblasti hodnocení jsem vybral z výše uvedených druhů hodnocení tyto:

- vrcholová hodnota;
- maximální rozkmit;
- střední hodnota.

9.1.2. Rychlá Fourierova transformace v programu Microsoft Excel pro kmitočtovou analýzu

Pro zhotovení rychle Fourierovi transformace je nutné ji doinstalovat, není součástí základního balíčku programu. Pro instalaci tohoto doplňku je zapotřebí kliknout na tlačítko Microsoft Office, poté na Možnosti aplikace Excel. Vybereme položku Doplňky a v rozevřacím seznamu Spravovat vybereme položku Doplňky aplikace Excel. Vybereme tlačítko Přejít. V seznamu Doplňky k dispozici zaškrtneme políčko Analytické nástroje a poté klikneme na tlačítko OK.

V první části musíme určit, s jakým množstvím dat budeme pracovat. Zde je velké omezení použití programu Excel. Je možné zpracovávat pouze data, která jsou mocninou dvou, např. 256 (28), 512 (29), 1024 (210), ale jen do hodnoty 4096 (212). V mém případě při naměření 1000 hodnot jsem zbývajících 24 hodnot doplnil předchozími hodnotami, tyto hodnoty nejsou zahrnuty v grafu.

A nyní k samotné rychlé Fourierově transformaci:

- Změřená data jsou ve sloupcích A (čas) a B (zrychlení). Jako první vytvoříme sloupec E s názvem Komplexní FFT. Klikneme na záložku Data, poté na Analýza dat. Z analytických nástrojů vybereme Fourierova analýza. Do vstupní oblasti vybereme naměřená data, to jsou hodnoty $\$B\$2: \$B\1025 . Jako možnost výstupu vybereme Výstupní oblast a vybereme v programu excel rozsah polí $\$E2: \$E\$1025$, poté klikneme na OK.
- Dalším krokem je magnituda ve sloupci D. Výpočet provedeme zadáním příkazu $2/1024*IMABS(E2)$. Tažením za pravý spodní roh pole D2 doplníme hodnoty až do konce našeho měření.
- Posledním krokem je doplnění frekvence FFT do sloupce C. Do prvního sloupce zadáme 0, frekvenci druhého řádku spočteme jako $1*(\text{samplovací frekvence}/\text{počet vzorků})$, třetího řádku $2*(\text{samplovací frekvence}/\text{počet vzorků})$ a pro další řádky pokračujeme analogicky. Ruční zadání by bylo zdlouhavé a tak použijeme automatické vyplnění v záložce Domů – Úpravy – Vyplnit – Řady (pozor je potřeba být na druhém řádku sloupce FFT frekvence). Doplníme konečnou hodnotu – samplovací frekvence a velikost kroku – samplovací frekvence/ počet vzorků.

10. Prezentace výsledků

Na dalších stranách prezentuji výsledky měření a jejich zpracování. Po představení jednotlivých komunikací porovnám výsledky mezi sebou. Nejdříve popíši umístění zkoušené komunikace, její zvláštnosti, pak představím tabulky kvantitativního měření a výpočet místa poruchy z frekvence a poté grafy zrychlení závislého na čase, dráhy závislé na čase a graf amplitudové frekvenční analýzy.

10.1. Vozovka z žulových kostek

Jako první zkoušený povrch jsem vybral vozovku z žulových kostek na ulici Karmelitánská v centru města Pacova.

Rychlost jízdy vozidla byla 30 km/h, snímal jsem celkem 1000 vzorků po dobu 10 sekund. Zaznamenání hodnot probíhalo každých 8,3 centimetru.

Naměřená data jsem zpracoval v programu Microsoft Excel 2007 dle postupu, který je uveden výše. Vykreslil jsem dva grafy, které nám blíže a jednodušeji představí naměřené hodnoty.

Pro výpočet místa poruchy z frekvence jsem vypsál hodnoty amplitudy přesahující 0,035. Z těchto frekvencí od čísla 44,82 Hz až po poslední hodnotu 49,61 se dráha významné poruchy vykytuje mezi 16,7 cm až 18,5 cm. Rozdíl mezi těmito vypočítanými hodnotami a reálnou velikostí žulových kostek (19 až 20 cm) lze vysvětlit natočením kostek ke směru jízdy.

Kvantitativní hodnocení vibrací v časové oblasti

vrcholová hodnota	1,18 m/s ²
maximální rozkmit	2,85 m/s ²
střední hodnota	- 0,10 m/s ²

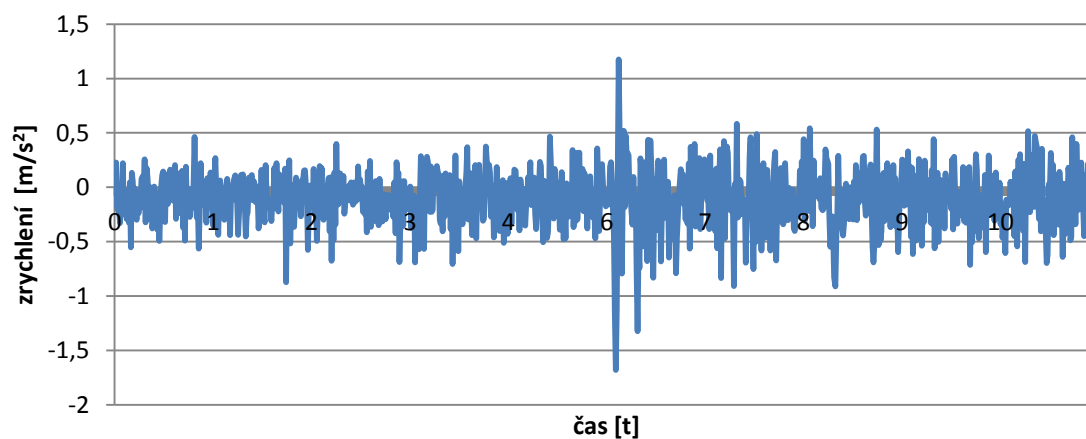
Výpočet místa poruchy z frekvence

Frekvence (Hz)	Amplituda	dráha (m)
4,49	0,039	1,85
12,50	0,049	0,66
12,79	0,047	0,65
12,89	0,039	0,64
13,48	0,035	0,61
22,56	0,039	0,36
44,82	0,041	0,185
48,05	0,040	0,17
48,63	0,038	0,17
49,61	0,036	0,167

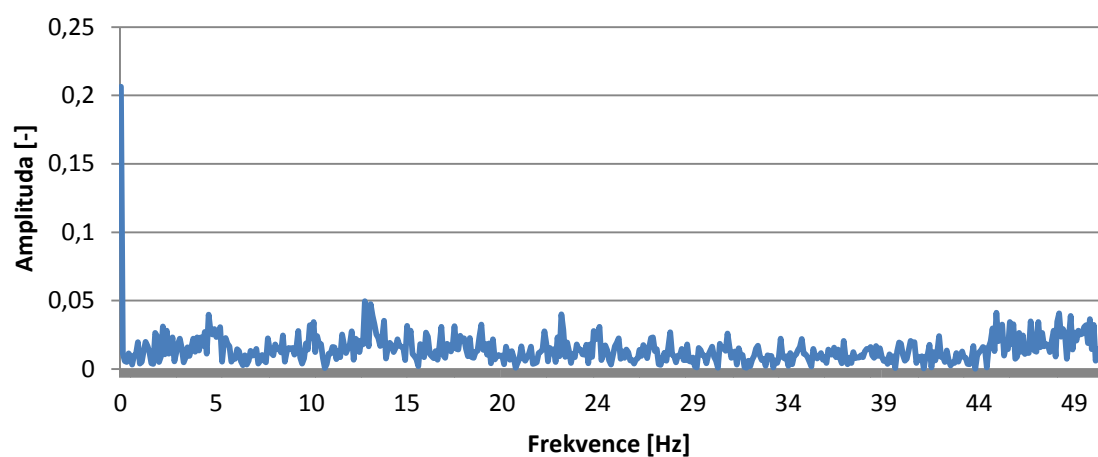


Obrázek 12 – Vozovka ze žulových kostek

Graf zrychlení



Amplitudová frekvenční analýza



10.2. Silnice II/129

Další zkoušená komunikace byla silnice II/129 ve směru z obce Samšín do Pacova. Rychlost měření byla opět 30 km/h. Velikost vysokých amplitud, které jsem nechal vypsát, jsou větší než 0,006. Tyto hodnoty jsou o jeden řád nižší než v případě vozovky ze žulových kostek, proto bych ani opakování místa poruchy nepovažoval v tomto případě za směřodonné a určoval bych nerovnost vozovky pouze z grafu zrychlení.



Obrázek 13 – Silnice II/129

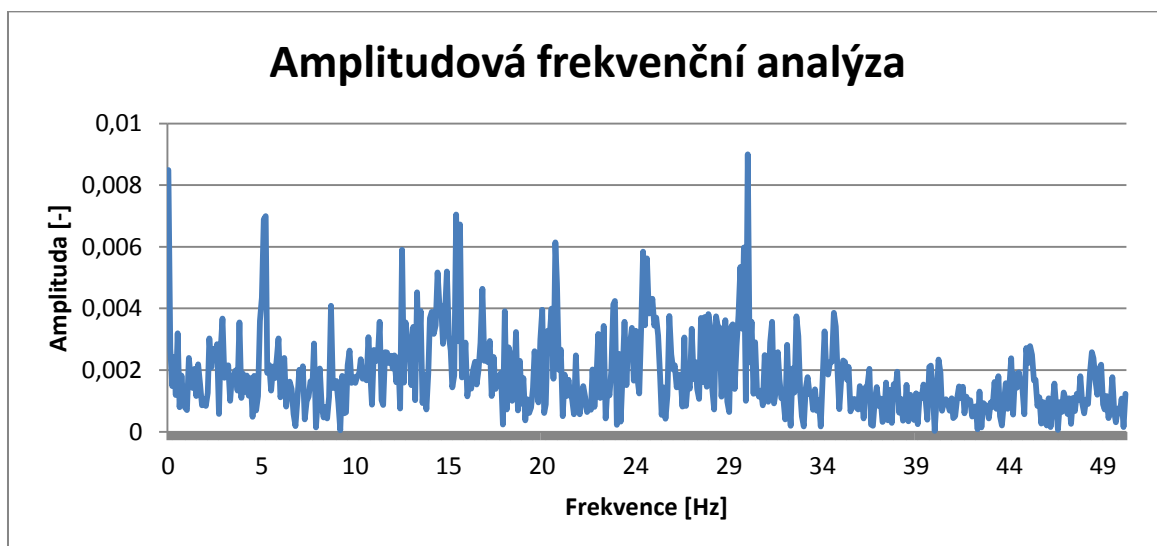
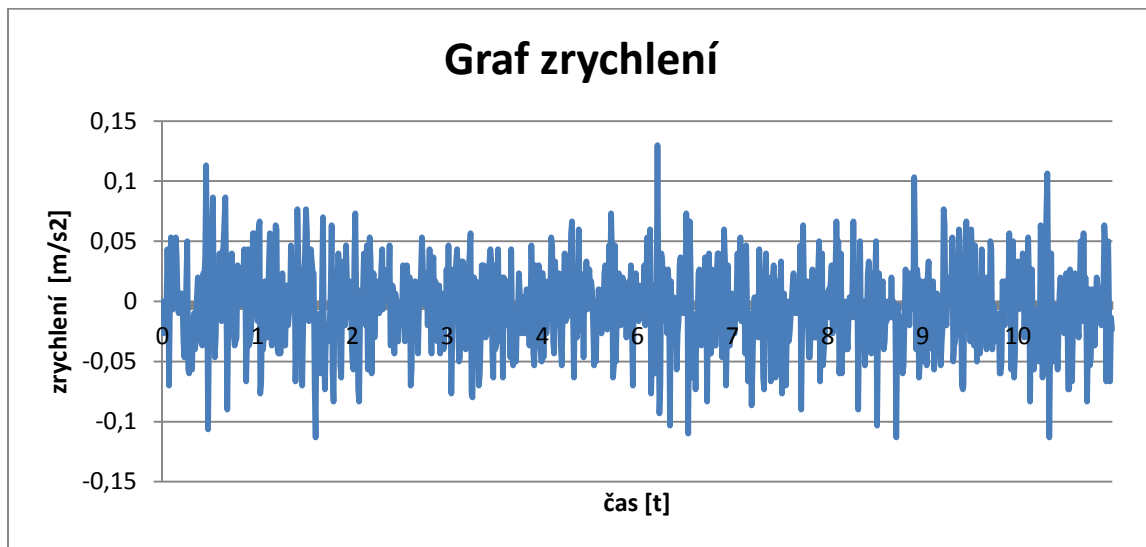
Kvantitativní hodnocení vibrací v časové oblasti

vrcholová hodnota	0,129	m/s^2
maximální rozkmit	0,24	m/s^2
střední hodnota	-0,004	m/s^2

Výpočet místa poruchy z frekvence

Frekvence (Hz)	Amplituda	Dráha (m)
4,98	0,0068	1,67
5,08	0,0069	1,64
15,04	0,0070	0,55
15,23	0,0067	0,54

20,21	0,0061	0,41
30,27	0,0090	0,27



10.3. Panelová vozovka v záplavové oblasti

Panelová vozovka v záplavové oblasti je umístěna na účelové komunikaci ZD Velká Chyška mezi obcemi Samšín a Velká Chyška. Rychlost měření byla 30 km/h. Již z grafu zrychlení v ose Z jsou patrné velké výkyvy převyšující hodnotu $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$. Tyto hodnoty se vždy opakují na zlomech jednotlivých panelů. Z grafu amplitudové frekvenční analýzy jsem nechal vypsát hodnoty amplitudy převyšující 0,02. Místa významně opakující se poruchy se pohybují okolo 70 centimetrů, které odpovídají velikosti délky jednotlivých panelů.



Obrázek 14 – Panelová vozovka v záplavové oblasti

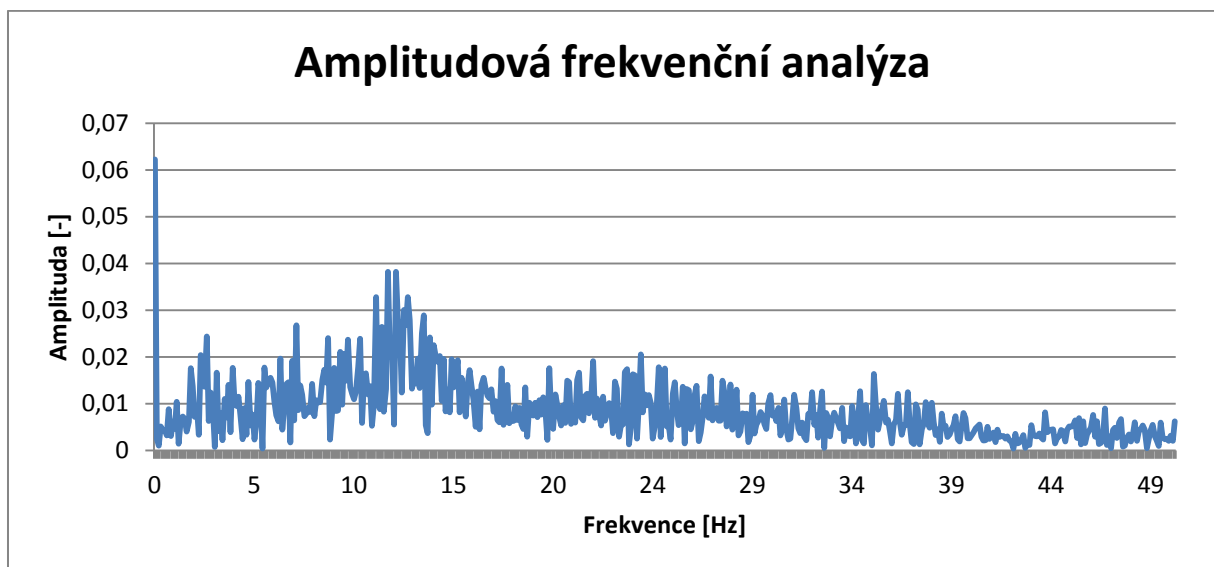
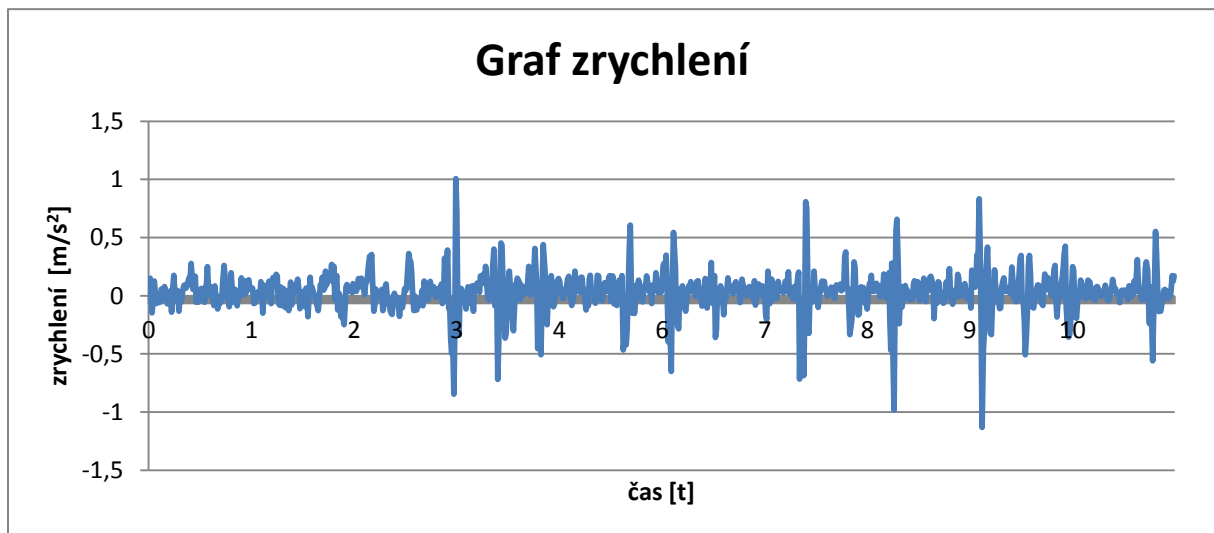
Kvantitativní hodnocení vibrací v časové oblasti

vrcholová hodnota	1,005 m/s^2
maximální rozkmit	2,13 m/s^2
střední hodnota	0,03 m/s^2

Výpočet místa poruchy z frekvence

Frekvence (Hz)	Amplituda	Dráha (m)
6,93	0,026	1,20
10,84	0,032	0,76
11,13	0,026	0,74
11,43	0,038	0,72
11,82	0,038	0,705

11,91	0,028	0,699
12,01	0,025	0,693
12,21	0,030	0,682
12,30	0,026	0,677
12,40	0,032	0,67
12,50	0,027	0,66
13,09	0,02	0,63
13,18	0,028	0,632



10.4. Místní komunikace

Místní komunikace je v obci Samšín, jedná se o vozovku s prolévanou vrstvou. Rychlost měření byla také 30 km/h. Z měření je patrné, že většina zrychlení se pohybuje v hodnotách větší než $\pm 0,1 \text{ m/s}^2$. Žádné zrychlení není několikrát větší, než okolní hodnoty a proto nelze ani ze zrychlení určit například přítomný výmol.

V tomto případě nelze ani pomocí frekvence vypočítat přesné místo opakují se poruchy krytu vozovky. Lze pouze stanovit, že celkový měřený usek je velmi nerovný.



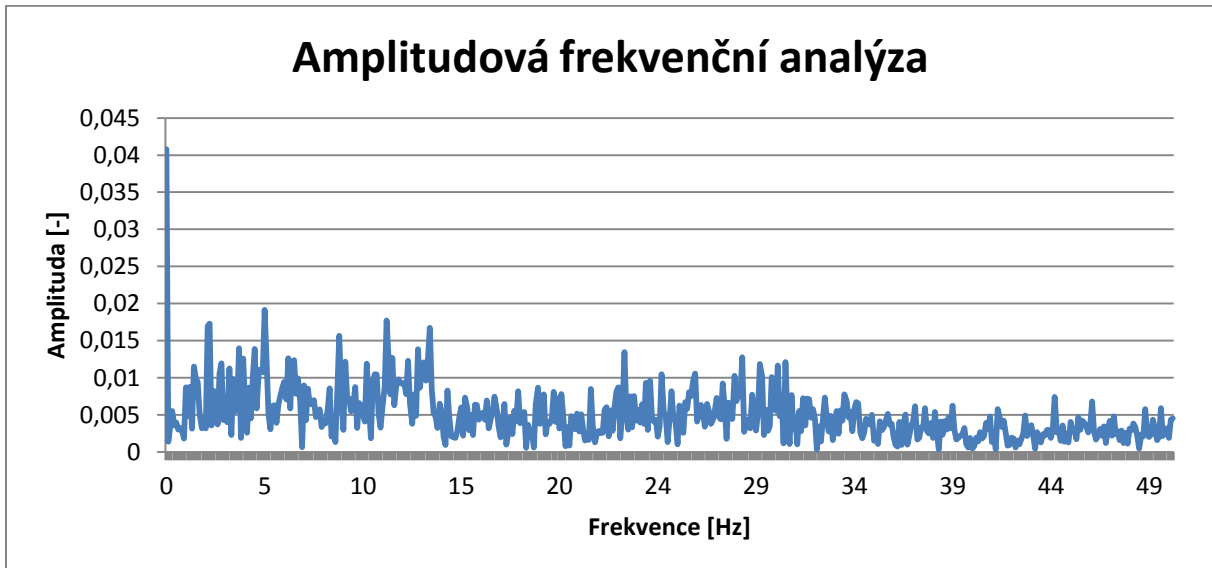
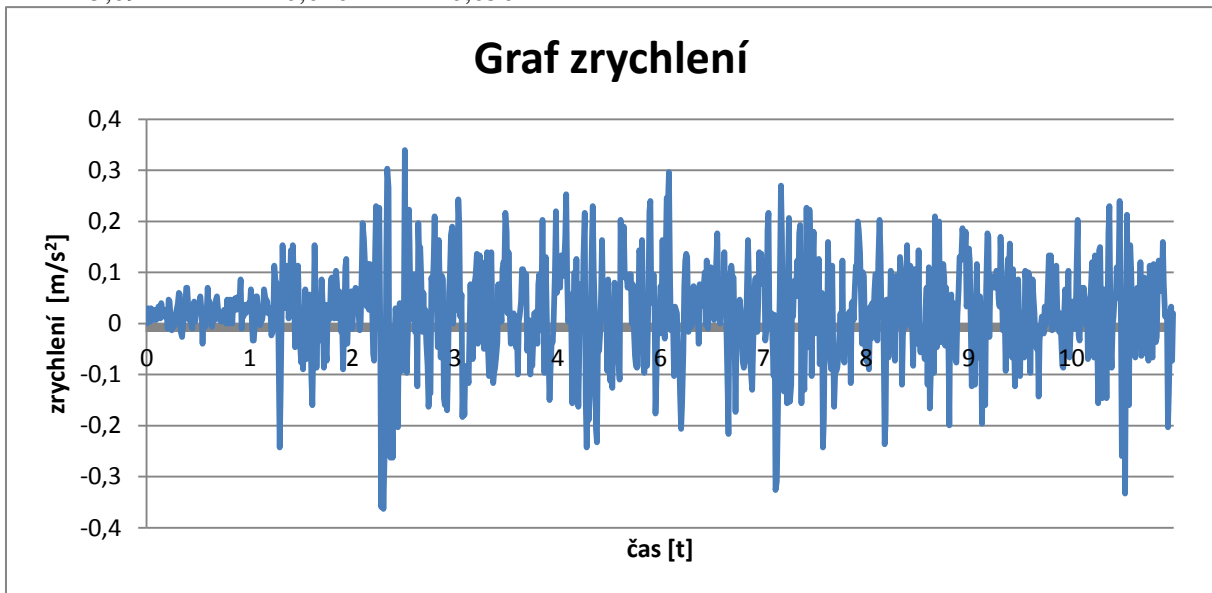
Obrázek 15 – Místní komunikace

Kvantitativní hodnocení vibrací v časové oblasti

vrcholová hodnota	0,339 m/s^2
maximální rozkmit	0,702 m/s^2
střední hodnota	0,020 m/s^2

Výpočet místa poruchy z frekvence

Frekvence (Hz)	Amplituda	dráha (m)
2,05	0,016	4,063
2,15	0,017	3,878
4,88	0,019	1,706
8,59	0,015	0,969
10,94	0,017	0,761
13,09	0,016	0,636



10.5. Porovnání hodnocení rovnosti vozovek

Porovnání naměřených hodnot lze provádět v několika oblastech. Jako první lze porovnat grafy. Vozovky jsou rozdílného charakteru a proto i výsledky měření budou dostatečně odlišné. Zrychlení se pohybuje u vozovky ze žulových kostek v průměrném rozmezí $-0,5$ až $+0,5$ m/s^2 , u silnice II/129 průměrně od $-0,05$ až po $+0,05$ m/s^2 , u panelové vozovky od $-0,03$ po $+0,03$ m/s^2 s velkými výkyvy zrychlení na přechodech jednotlivých panelů v rozsahu od $0,5$ po 1 m/s^2 , u místní komunikace se hodnoty po celé délce měření pohybují průměrně v rozsahu $-0,2$ až $+0,2$ m/s^2 .

Z vysokých jak kladných, tak záporných hodnot zrychlení lze usoudit, že v daném místě se vyskytují poruchy krytu vozovky. Významné lokální poruchy krytu vozovky jsou patrné z velikosti zrychlení, které je významně větší než okolní hodnoty.

Poslední oblastí výsledků v časové oblasti je porovnání kvantitativního hodnocení vozovek, které jsem zpracoval do přehledné tabulky.

Porovnání kvantitativního hodnocení vozovek

	Vrcholová hodnota (m/s^2)	Maximální rozkmit (m/s^2)	Střední hodnota (m/s^2)
Kostky	1,17	2,85	-0,104
Silnice II/129	0,12	0,24	-0,004
Panelová vozovka	1,005	2,13	0,031
Místní komunikace	0,33	0,70	0,020

Poslední oblastí srovnání je ve frekvenční oblasti. Pomocí Fourierovy transformace jsem vytvořil grafy amplitudové frekvenční analýzy, které nám říkají, jak často se určitá zrychlení v daném signálu vyskytují. Pro lepší představu uplatnění FFT jsem vypočetl místo (délku opakování) jednotlivých poruch. U vozovky ze žulových kostek frekvencí 44,82; 48,05; 48,63 a 49,61 s amplitudou větší než 0,35 nám popisují velikost jednotlivých kostek. Nižší frekvence a vypočítané délky jsou násobkem těchto základních velikostí kostek. Toto lze velmi dobře dokázat i u vozovky z panelů, kde velikost panelů je 70 až 80 cm.

11. Závěr

Hlavním přínosem této bakalářské práce je ověření použití IMU k měření nerovností povrchů vozovek a nalezení způsobu vytvoření FFT v programu Microsoft Excel.

Mezi hlavní výhody použití IMU patří nastavení doby snímání a počet naměřených hodnot. Z tohoto lze vypočítat, po jaké vzdálenosti při konkrétní rychlosti jednotka snímá povrch. Časová náročnost je také nižší než například při měření nerovností latí.

Pro lepší výpovědní hodnotu tohoto způsobu měření by bylo zapotřebí změřit množství povrchů stejného typu a z nich vytvořit referenční hodnoty, s kterými bychom mohli naměřená data porovnávat jak v časové, tak i ve frekvenční oblasti. Ve frekvenční oblasti by nám velikost amplitudy překročila určitou křivku a věděli bychom, že daná vozovka nesplňuje předepsaná kritéria.

Prodloužení doby měření z 10-ti sekund na čas okolo 11,4 sekundy bylo nejspíše způsobené zahlcením programu daty, protože bylo snímáno zrychlení ve všech třech osách. Doporučoval bych snímat jen veličinou, která nás zajímá.

Hlavní nevýhodou měření je, že jednotka měří jen v ose kol automobilu. Jako výstup dostaneme hodnoty ve stopě vozidel, proto je spíše měření vhodnější k přejímce a kontrolám nových vozovek.

Další nevýhodou mého měření bylo umístění IMU na palubní desce. Automobil mnoho nerovností pomocí tlumičů utlumil úplně nebo snížil jejich velikost pro zaznamenání. Při jízdě ve stoupání a klesání není měřící jednotka umístěna zcela svisle a dochází i tímto ke zkreslení výsledků.

Doporučení pro další práci s IMU:

- Vytvořit univerzální držák pro IMU, který lze připevnit nejlépe na nápravu automobilu pro přesné snímání hodnot zrychlení a jeho natáčení do svislé polohy při jízdě po stoupající a klesající vozovce.
- Naměřit několik povrchů vozovek stejného typu a vytvořit mezní hodnoty jak pro zrychlení, tak i pro amplitudu frekvenční analýzy.

Inerciální měřící jednotka prokázala, že je schopna měřit povrch vozovek s velkou citlivostí a proto najde své místo v měření nerovností povrchů vozovek.

12. Použité zdroje

1 Lechner, W., (1988): Untersuchung einer kreisorientierten Landfahrzeug-Navigationsanlage im Hinblick auf geodätische Anwendungen und Möglichkeiten der Höhenübertragung. (Schriftenreihe der Universität der Bundeswehr) München 1988.

2 Huddle, J. R., (1973) A study of the Position and Azimuth Determining Systems for Mapping, Charting and Geodesy Applications. USAETL, DAAK 02-73-C-0239, 1973.

3 Schwarz, K. P., kol., (1990) Kinematic Modelling – Progress and Problems. In: International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing. Kanada, Banff 1990.

4 Norling, B., (1990): Accelerometers: Current and Emerging Technology. Proceedings International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing. Kanada, Banff 1990.

5 Špůrek J., (1972): Silniční stavitelství I – projektování silnic a dálnic. Praha, 1972.

6 http://www.viageos.cz/tech_udaje.asp

7 Manuál Analog Devices ADIS16400BMLZ.

8 KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD, (2006): Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura.

9 HORÁK, Richard, (2012): Fyzikální základy laserových dálkoměrů a gyroskopů. 1. vyd. Olomouc: Chlup.net, 2012.

10 Manuál Analog Devices ADISUSBZ.

11 ŽALUD, V., Moderní radioelektronika. BEN - technická literatura, Praha, 2000.

13. Seznam použitých zkratk

IMU	Inerciální měřicí jednotka
MEMS	Mikroelektromechanické systémy
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
FFT	Rychlá Fourierova transformace
IFFT	Inverzní (zpětná) Fourierova transformace