

<p>UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera Dislokované pracoviště Česká Třebová</p>	<p><b>BAKALÁŘSKÁ PRÁCE</b></p>	<p>Strana -1-</p>
--	--------------------------------	-------------------

**Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Dislokované pracoviště Česká Třebová**

**Statistické zpracování dat z měření zrychlení na železničním vozidle**

**Martin Bartoš**

**Bakalářská práce  
2011**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin BARTOŠ**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Kolejová vozidla**  
Název tématu: **Statistické zpracování dat z měření zrychlení na železničním vozidle**  
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Statisticky analyzovat naměřená data signálů zrychlení na reálném vozidle a provést hodnocení a porovnání výsledků s ohledem na různé typy kvality trati a traťových úseků, rychlost a další vlivy. Provést srovnání naměřených údajů z různých typů snímačů. Vypracujte:

1. Statistické zpracování naměřených dat.
2. Porovnání statistických charakteristik naměřených dat z různých jízd.
3. Porovnání statistických charakteristik naměřených dat z různých typů snímačů.
4. Analýza dosažených výsledků.

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího BP  
Rozsah pracovní zprávy: 40 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- [1] ANDĚL, J.: Matematická statistika, SNTL&ALFA, Praha, 1978.
- [2] CYHELSKÝ, L., KAHOUNOVÁ, J., HINDLS, R.: Elementární statistická analýza, Praha, Management Press, 1996.
- [3] MELOUN, M., MILITKÝ, J.: Statistické zpracování experimentálních dat. Univerzita Pardubice, Pardubice, 1996.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Kohout**  
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **26. února 2010**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2010**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

## Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst.1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

Ve Veselí nad Moravou dne 23. 04. 2011

Martin Bartoš

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval především Ing. Martinu Kohoutovi za odborné vedení práce, poskytnutí některých podkladů a konzultace a Mgr. Janě Vyoralové za jazykovou korekturu textu.

## **Souhrn**

Práce se zabývá nejprve vyhodnocením dat z měření zrychlení na železničním vozidle indukčností a piezoelektrickým snímačem a následně porovnáním jejich statistických charakteristik. Na začátku jsou uvedeny veškeré teoretické předpoklady, na jejichž základě pak dochází k vyhodnocování dat a porovnávání statistických charakteristik mezi jednotlivými typy snímačů a mezi jízdami v přímé koleji a v oblouku.

## **Klíčová slova**

Železniční vozidlo, indukčnostní snímač, piezoelektrický snímač, zrychlení, rychlost, poloměr oblouku, směrodatná odchylka, kvantil

## **Title**

Statistical processing of data from railway vehicle acceleration measurement

## **Abstract**

The study deals with the data evaluation from measurement of acceleration of railway carriage by the inductivity detector and piezoelectric detector and the comparison of their statistic characteristics. At the beginning relevant theoretical assumptions are introduced which present the basis for data evaluation and comparison of statistic characteristics between different types of detectors as well as between drives on straight line and archway.

## **Keywords**

Railway carriage, inductivity detektor, piezoelectric detektor, acceleration, rate, curve radius, standard deviation, fractile

## Obsah

Obsah	7
1. Úvod	8
2. Obecná část	9
2.1. Metody a prostředky měření .....	9
2.1.1. Snímače	9
2.1.2. Úprava signálu	9
2.1.3. Analogově-digitální převod	10
2.2. Měření zrychlení na železničním vozidle .....	11
2.2.1. Snímače zrychlení	11
2.2.2. Základní konstrukční části snímačů zrychlení	12
2.2.3. Typy snímačů zrychlení	12
2.3. Možné postupy pro vyhodnocení dat .....	15
2.3.1. Statistické charakteristiky	15
2.3.2. Test dobré shody pro ověření normálního rozdělení	17
2.3.3. Korelační koeficient	18
3. Statistické zpracování naměřených dat	19
3.1. Zdroj dat, podmínky a úseky měření .....	19
3.2. Měřicí technika .....	20
3.3. Postup při vyhodnocování dat .....	22
4. Vliv filtrace na vyhodnocená data	24
5. Vliv typu filtru na vyhodnocená data	33
6. Porovnání statistických charakteristik naměřených dat z různých typů snímačů	35
6.1. Porovnání snímačů s2 a s9 (svislý směr; přední ložisková skříň ve směru jízdy)....	35
6.2. Porovnání snímačů s12 a s10 (svislý směr; zadní ložisková skříň ve směru jízdy) .	37
6.3. Porovnání snímačů s7 a s11 (příčný směr; rám podvozku) .....	39
6.4. Koeficienty korelace .....	41
6.5. Porovnání snímačů s9 a s10 (svislý směr) .....	43
7. Porovnání statistických charakteristik naměřených dat z různých jízd	48
7.1. Závislost na rychlosti .....	48
7.2. Závislost na poloměru oblouku .....	51
8. Závěr	56
9. Seznam použité literatury	58

## 1. Úvod

Jednou ze zkoušek na železničním vozidle je měření zrychlení. To se provádí zejména proto, aby bylo možné posuzovat dynamické účinky kolejového vozidla na trať a na cestujícího, což je určující podmínka k bezpečnému provozu a komfortu jízdy kolejového vozidla.

Jedním z cílů práce je porovnat mezi sebou různé typy snímačů z důvodu jejich vzájemné zaměnitelnosti. Toho bude dosaženo statistickým vyhodnocením naměřených dat na základě teoretických poznatků. Výstupem pak budou vybrané statistické charakteristiky, z nichž se stanoví odchylky mezi různými typy snímačů.

Dále se budou posuzovat dynamické účinky v jednotlivých traťových úsecích. Naměřená data totiž pochází z různých úseků s rozdílnou kvalitou svršku. Některá byla získána měřením na modernizované trati, jiná zase na nemodernizované trati. U úseků v přímé koleji se bude sledovat závislost výsledků z měření na rychlosti jízdy a u úseků v oblouku zase závislost na poloměru oblouku.



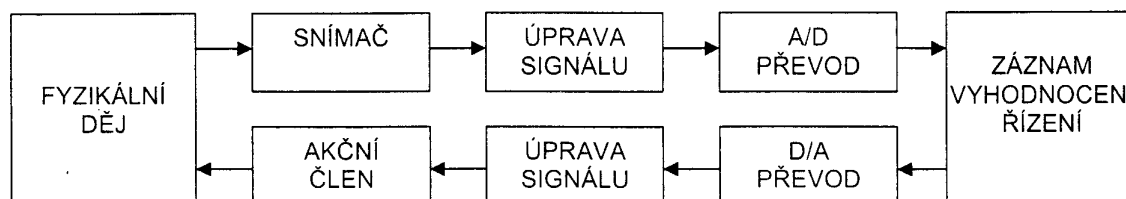
## 2. Obecná část

### 2.1. Metody a prostředky měření

Sledovaný fyzikální proces je charakterizován určitými fyzikálními veličinami. Při měření se průběh těchto veličin zaznamenává a vyhodnocuje.

Fyzikální veličinou závislou na čase (proměnlivou) nazýváme signál. Signály mohou být spojité nebo diskrétní v čase a dále pak spojité nebo diskrétní v úrovni hodnot, kterých nabývají. Fyzikální veličiny charakterizující reálné fyzikální procesy jsou nejčastěji spojité v čase i ve své úrovni a označují se jako analogové signály. Naproti tomu signály diskrétní v čase i v úrovni nabývaných hodnot se nazývají digitální signály (číslíkové) a jsou zpracovatelné pomocí výpočetní techniky, která pracuje pouze s digitálními hodnotami.

Velký rozvoj počítačových technologií radikálně ovlivnil i způsob provádění měření. Měření je většinou součástí celého počítačově řízeného systému pro měření a případně zpětné řízení fyzikálního procesu, při kterém je spojitá analogová fyzikální veličina převedena do digitální reprezentace a naopak – **obr. 1**.



*Obr. 1 Schéma měření a zpětného řízení fyzikálního procesu [1]*

#### 2.1.1. Snímače

Zajišťují převod měřené fyzikální veličiny na elektrickou veličinu (napětí, proud nebo elektrický náboj). Nejčastěji se jedná o napětí v obvyklých rozsazích 0-10 V, resp.  $\pm 5$  V, případně nízkoúrovňový napěťový signál typický pro termočlánky.

#### 2.1.2. Úprava signálu

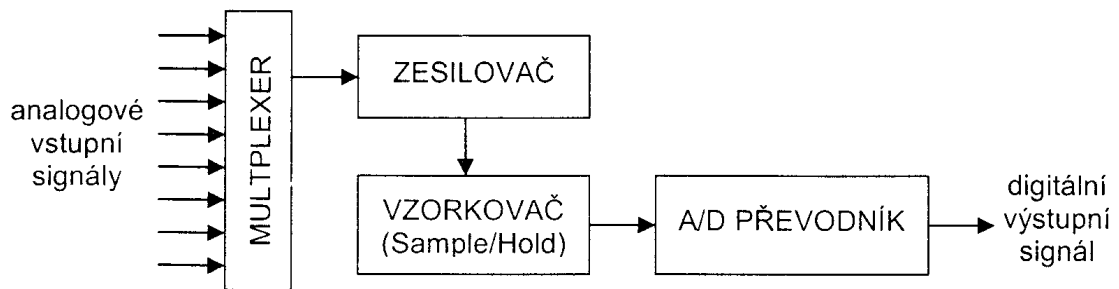
Úpravou signálu se rozumí úprava analogové elektrického signálu před jeho digitalizací. Především se jedná o filtrování, zesílení, případně další zpracování signálu. Úpravu signálu, především zesílení, je potřeba provádět co nejbližší zdroji signálu, kde signál ještě není ovlivněn šumy.

Filtry slouží k odstranění, resp. propuštění pouze určité části frekvenčního spektra signálu. Podle toho rozeznáváme typy: dolní propust (low-pass) – viz antialiasingový filtr, horní propust (high-pass), pásmová propust (band-pass), pásmová zadrž (band-reject).

Konstrukčně se analogové filtry dělí na pasivní a aktivní. Méně účinné pasivní filtry vznikají vhodným zapojením kapacit a indukčností. Moderní aktivní filtry, jejichž základním článkem je operační zesilovač, je možné navrhnout tak, že velmi přesně splňují požadované parametry filtrace.

### 2.1.3. Analogově-digitální převod

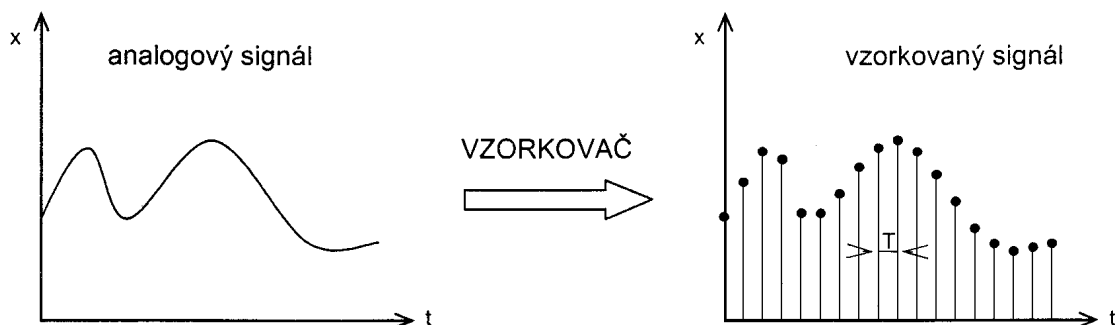
A/D (analogově-digitální) převodník opakovaně převádí analogový vstupní signál na výstupní digitální signál. Při převodu se provádí vzorkování a kvantování signálu. Blokové schéma analogově digitální části typické multifunkční měřicí karty je na **obr. 2**.



**Obr. 2** Blokové schéma A/D části multifunkční karty [1]

Vlastní A/D převodník, který je nejdražší součástí karty, je pouze jeden. Jednotlivé analogové vstupy jsou přepínány multiplexerem k obvodu zesilovače. Zesilovače mohou být s pevným zesílením pro všechny kanály, s hardwarově nastavitelným zesílením, nebo jsou programově řízené s možností nastavení různého zesílení pro jednotlivé kanály. Obvod vzorkovače (Sample/Hold) provádí vzorkování signálu požadovanou frekvencí a udržuje jeho neměnnost po dobu převodu A/D převodníkem.

Vzorkováním – **obr. 3** se analogový signál periodicky snímá neboli vzorkuje s periodou  $T$ . Výsledkem je posloupnost analogových hodnot – signál v diskretní v čase a analogový v úrovni.



**Obr. 3** Vzorkování signálu [1]

Frekvence, s jakou převodník vzorkuje spojité signál, se nazývá vzorkovací frekvence. Pro zajištění správné následné interpretace digitálního signálu je třeba, aby bylo splněno známé Nyquistovo kritérium:  $f_{\text{vzorkování}} > 2 f_{\text{požadovaná}}$ .

Při nevhodně nízké volbě vzorkovací frekvence bude navzorkovaný signál odpovídat zcela jinému průběhu signálu. Tato chyba se nazývá aliasing.

Pro zamezení vzniku aliasingu je třeba kromě správné volby vzorkovací frekvence používat antialiasingový filtr typu dolní propust, který z měřeného signálu odřízne složky o frekvenci vyšší než je polovina vzorkovací frekvence.

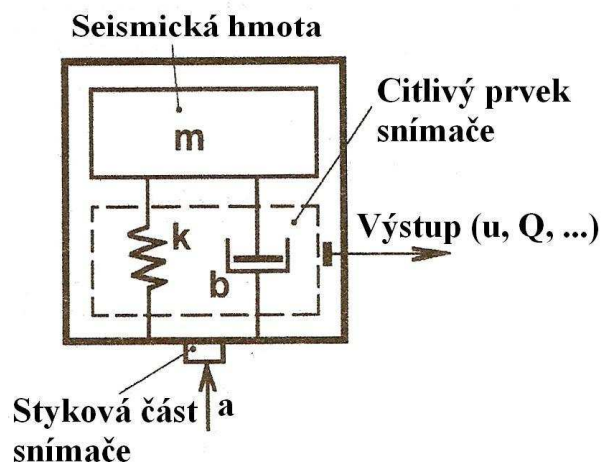
Při kvantování převádí A/D převodník navzorkovaný signál (posloupnost analogových hodnot) na posloupnost diskrétních hodnot. Rozlišení A/D převodníku se udává v bitech a představuje počet postupného dělení celého měřeného rozsahu na jednotlivé úrovně.[1]

## 2.2. Měření zrychlení na železničním vozidle

Měření zrychlení je důležitou součástí zkoušek dopravní techniky. Nevyhnutelnou podmínkou těchto měření je použití vhodných snímačů měření zrychlení. Snímače zrychlení je možné rozdělit do několika skupin podle různých hledisek. Takto můžeme hovořit o snímačích bezdotykových a dotykových, mechanických, hydraulických, pneumatických, optických a elektrických. Další dělení je na relativní a absolutní.

### 2.2.1. Snímače zrychlení

Jednou ze základních charakteristik snímačů zrychlení je jejich frekvenční rozsah, resp. frekvenční charakteristika. Z hlediska jejich interakce s kmitajícím měřeným objektem a možného ovlivnění dynamických charakteristik se vyžaduje, aby hmotnost snímačů zrychlení byla pokud možno co nejmenší. Principiální uspořádání je na **obr. 4**.



**Obr. 4** Schéma uspořádání snímače zrychlení [2]

Měřené zrychlení  $a$  se přivádí přes stykovou část na těleso snímače, ve kterém je pružně (a zpravidla s vhodným tlumením) uložena seismická hmota. Pohyb seismické hmoty se

převádí vhodným způsobem citlivým prvkem na elektrické veličiny, nejčastěji napětí  $U$ , náboje  $Q$  apod.

### 2.2.2. Základní konstrukční části snímačů zrychlení

#### Styková část s krytem

Styková část snímače zabezpečuje spojení snímače s objektem měření. Toto spojení může být realizované i jednoduchým dotykem, obvykle pomocí testovacího hrotu, ale častěji se používá pevné spojení.

Pevné spojení se nejčastěji realizuje pomocí šroubu, resp. šroubů. Šroub může být součástí snímače, nebo je v krytě snímače umístěný závitový otvor, a nebo několik otvorů pro šrouby na vyčnívajících částech krytu. Snímače se mohou upevňovat prostřednictvím speciálního montážního příslušenství (svěrné spojení s přišroubovanou patičí, magnet, mechanický filtr a pod.). Snímač je možné na měřený objekt upevnit i pomocí vosku, oboustranné lepicí fólie apod. Všeobecně však platí, že jiné než šroubovitě spojení zhoršuje frekvenční charakteristiku snímače.

Kryt snímače bývá nejčastěji z hliníkové slitiny nebo nerezavějící oceli.

#### Seismické těleso

Slouží k vytvoření setrvačné síly, která působí na citlivý prvek snímače. Všeobecně platí, že větší seismická hmota vede k vyšší citlivosti snímače, ale na druhé straně vede ke snížení vlastní kruhové frekvence systému snímače a tím pádem k snížení jeho frekvenčního rozsahu. Z toho důvodu mají snímače zrychlení s větším frekvenčním rozsahem nižší citlivost.

#### Citlivý prvek

Citlivými prvky snímačů jsou nejčastěji pružina, nosník, piezoelektrický krystal, servokompenzační obvod apod. Citlivý prvek a seismická hmota mají být uspořádány tak, aby měl snímač pokud možno co nejmenší příčnou citlivost.

### 2.2.3. Typy snímačů zrychlení

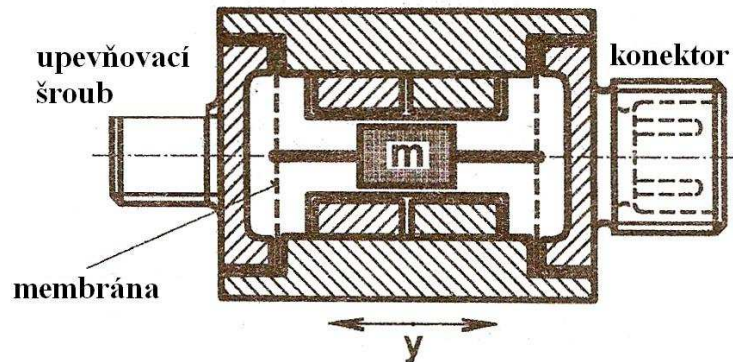
- Indukčnostní snímač zrychlení
- Piezoelektrický snímač zrychlení
- Kapacitní snímač zrychlení
- Tenzometrický snímač zrychlení

Vzhledem k tomu, že v této práci budou dále srovnávána data z indukčnostních a z piezoelektrických snímačů, budou podrobněji popsány pouze tyto dva typy snímačů zrychlení.

#### Indukčnostní snímač zrychlení

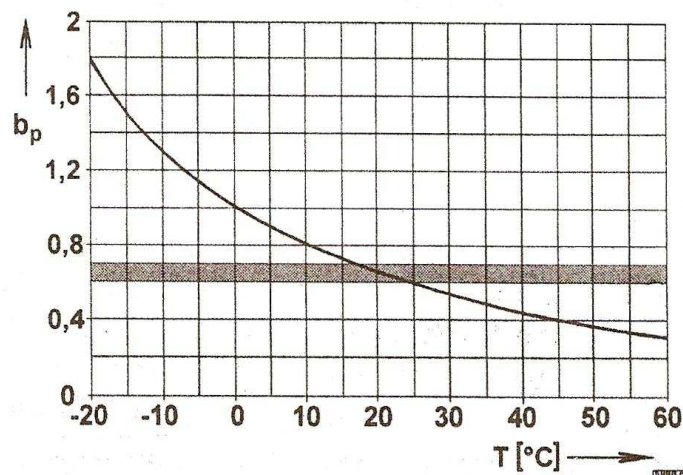
Indukčnostní snímače zrychlení, které jsou poměrně rozšířené, jsou určeny na měření zrychlení ve frekvenčním rozsahu od nuly po několik kHz.

Tyto snímače mají feritové jádro pohybuující se v cívkách, které tvoří poloviční můstek a současně představuje větší část seismické hmoty. Vnitřek snímače bývá vyplněn silikonovým olejem, tím pádem povrch jádra tvoří současně funkční plochy viskozního tlumiče. Pružina je často vytvořena dvěma pružnými membránami, které mají zároveň funkci přímovodu. Příklad možného konstrukčního uspořádání snímače indukčnostního snímače zrychlení je na **obr. 5**.



**Obr. 5** Konstrukční uspořádání indukčnostního snímače [2]

I přesto, že se na tlumení používají silikonové oleje, které mají výrazně menší závislost viskozity na teplotě, dochází k nezanedbatelnému ovlivňování velikosti poměrného útlumu a tedy i frekvenční charakteristiky snímače změnami teploty. Tlumení snímače se navrhuje tak, aby se optimální hodnota poměrného útlumu dosáhla při nejčastěji se vyskytujících teplotách. Příklad závislosti poměrného útlumu na teplotě pro snímače HBM typu B12 je uvedený na **obr. 6**.



**Obr. 6** Závislost poměrného útlumu na teplotě snímače HBM typ B12 [2]

Z uvedeného průběhu je zřejmé, že snímač pracuje v pásmu optimálních hodnot poměrného útlumu při okolní teplotě 20 °C, avšak už při odchylce cca 5 °C od této teploty se velikost poměrného útlumu dostává mimo optimální pásmo tlumení. Různí výrobci uvádějí

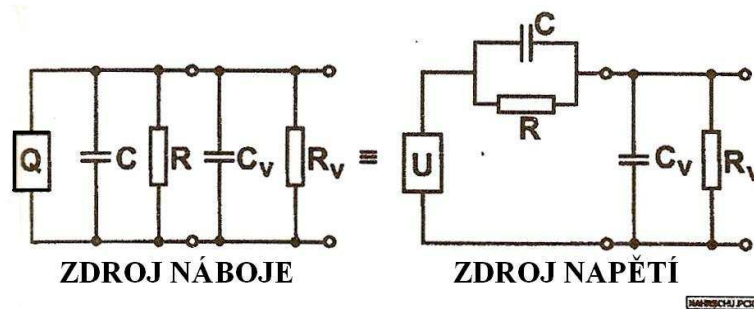
frekvenční rozsah snímačů zrychlení do cca 0,5 – 0,7 násobku vlastní kruhové frekvence. Je třeba si však uvědomit, že při větších odchylkách od teploty, na kterou je snímač nastavený, dochází k zúžení frekvenčního rozsahu snímače (pokud se nemá zvětšit chyba snímače).

Výhodou indukčnostních snímačů zrychlení je to, že mohou měřit zrychlení už od nulové frekvence, z čehož vyplývá jejich další výhoda, a to možnost statického cejchování.

### Piezoelektrický snímač zrychlení

Jde o poměrně rozšířené aktivní snímače zrychlení využívající piezoelektrický jev některých materiálů (např. krystal křemene, turmalínu nebo některých polarizovaných keramických materiálů).

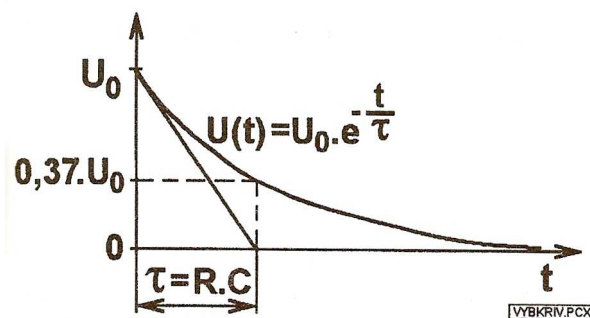
Napětíová citlivost piezoelektrických prvků na bázi krystalů je cca 0,1 V/N. Závislost napětí a stlačení je lineární, ale to platí jen pro rychlé děje. Piezoelektrický prvek svými polepy představuje kondenzátor s kapacitou  $C$ , ke kterému je paralelně připojen vysokoohmový svodový odpor  $R$ . Jeho náhradní elektrické schéma je na **obr. 7**.



**Obr. 7** Náhradní elektrické schéma piezoelektrického snímače a připojovacího vedení [2]

Vlivem konečných izolačních odporů samotného snímače, vodičů a konečného vstupního odporu měřicí aparatury dochází k vybíjení kondenzátoru a zároveň při konstantním zatížení krystalu dochází k rychlému poklesu napětí na polepech krystalu. To znamená, že tímto snímačem není možné měřit statické, resp. velmi pomalu se měnící veličiny.

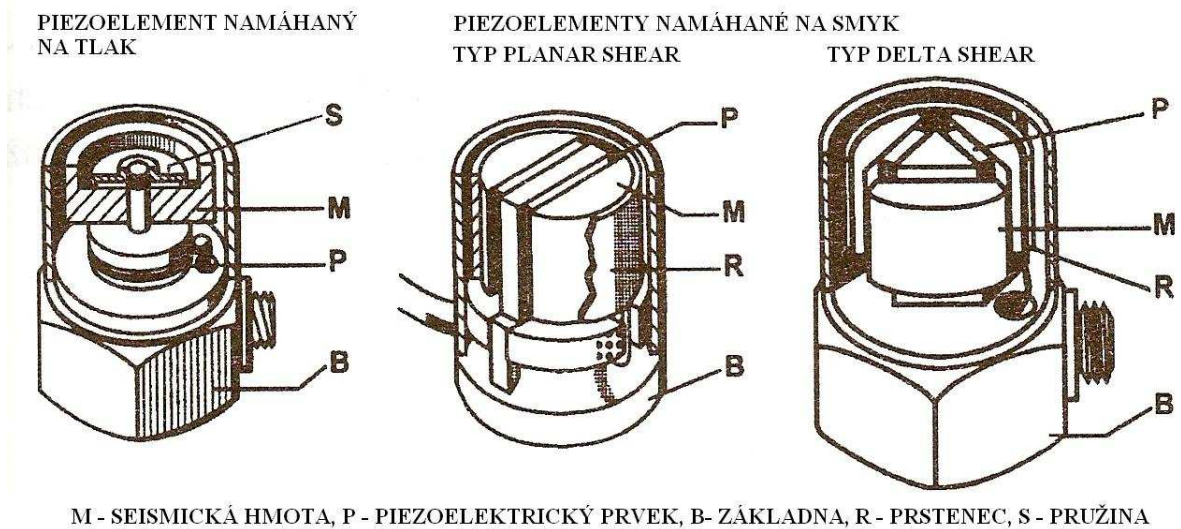
Piezoelektrický prvek je aktivní prvek a považuje se za zdroj náboje nebo napětí. Vybíjecí křivka kondenzátoru přes odpor je znázorněná na **obr. 8**.



**Obr. 8** Vybíjecí křivka kondenzátoru [2]

Piezelektrický snímač, zejména jako zdroj napětí, je výrazně ovlivňovaný připojovacím vodičem, který má vždy nějaký, i když velmi velký, svodový odpor a kapacitu.

Příklady konstrukčního uspořádání piezelektrických snímačů zrychlení různých typů jsou na následujícím obrázku.[2]



*Obr. 9* Konstrukční uspořádání základních typů snímačů zrychlení firmy Brüel & Kjaer [2]

## 2.3. Možné postupy pro vyhodnocení dat

V této kapitole budou uvedeny potřebné údaje a postupy, jež budou následně sloužit k vyhodnocení dat a jejich charakterizaci.

### 2.3.1. Statistické charakteristiky

Statistický soubor můžeme charakterizovat i pomocí číselných hodnot, které reprezentují celý soubor. Mezi těmito číselnými hodnotami, tzv. statistickými charakteristikami, jsou nejdůležitější dvě hlavní skupiny:

- Charakteristiky polohy – poskytují představu o celém sledovaném statistickém souboru ve formě jedné nebo více statistických charakteristik. Mezi nejznámější charakteristiky patří průměry (aritmetický, harmonický a geometrický), medián a modus.
- Míry variability – charakterizují míru rozptýlení hodnot znaku okolo střední hodnoty. K měření variability se používá variační rozpětí, průměrná odchylka, směrodatná odchylka, rozptyl a další.

#### Charakteristiky polohy

Charakteristiky polohy jsou čísla, která charakterizují úroveň hodnot znaku v statistickém souboru. Postupně budeme definovat aritmetický průměr, medián a modus.

Jednou ze základních vlastností průměru je, že se počítá ze všech hodnot kvantitativního znaku (a je jimi tedy ovlivněn).

a) Aritmetický průměr (ozn.  $\bar{x}$ )

Aritmetický průměr je nejčastěji používaná charakteristika polohy. Aritmetický průměr definujeme jako součet všech hodnot znaku dělený jejich počtem, tj. rozsahem souboru. Jestliže statistický soubor má rozsah  $n$  a statistický znak  $X$  nabývá hodnoty  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , potom aritmetický průměr je dán vztahem

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1)$$

b) Medián (ozn.  $\tilde{x}$ )

Medián je prostřední hodnota, kterou označujeme  $\tilde{x}$ . Je to hodnota, která se nachází ve středu souboru hodnot uspořádaného do neklesající posloupnosti.

c) Modus (ozn.  $\hat{x}$ )

Modus je hodnota znaku  $X$ , která má ve statistickém souboru největší četnost. Modus můžeme určit jen tehdy, když se četnosti  $f_i$  hodnot  $x_i$  znaku  $X$  odlišují. V případě, kdy jsou četnosti stejné, nemůžeme modus určit.[3]

Do charakteristik polohy je možné zahrnout taky kvantily. Kvantily dělí soubor na jednotlivé části. Některé z nich mají taky speciální označení, např. medián rozděluje soubor na dvě poloviny, označuje se jako kvantil  $\alpha 0,5$ . Kvartil odděluje od souboru jeho krajní čtvrtiny, má označení  $\alpha 0,25$  pro dolní kvartil a  $\alpha 0,75$  pro horní kvartil. Další speciální kvantily mohou být třeba decily nebo percentily.

### Míry variability

Statistické soubory se mohou lišit nejen v úrovni hodnot znaku (vyjádřené některou charakteristikou polohy), ale i variabilitou hodnot pozorovaného znaku. Míry variability charakterizují míru rozptýlení hodnot znaku. Některé míry variability se počítají vzhledem k vybrané charakteristice polohy. Takovými mírami jsou například průměrná odchylka, rozptyl a směrodatná odchylka. Zcela odlišně je koncipováno variační rozpětí a variační koeficient.

Variační rozpětí (ozn.  $R$ )

Variační rozpětí je rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou znaku.

Variační rozpětí zkoumaného znaku poskytuje základní pohled na proměnlivost hodnot znaku ve statistickém souboru. Jeho velikost závisí jen na krajních hodnotách, přičemž jedna z nich nebo obě mohou být extrémní hodnoty – pro daný soubor netypické, a proto mohou představu o variabilitě značně zkreslovat.

Rozptyl (ozn.  $\sigma^2$ )



Rozptyl (variace, disperze) je nejčastěji používaná míra variability. Počítáme ho jako aritmetický průměr čtverců odchylek hodnot od aritmetického průměru podle vztahu:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (2)$$

Směrodatná odchylka (ozn.  $\sigma$ )

Směrodatná odchylka  $\sigma$  je druhá odmocnina rozptylu:  $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$ . Variabilita znaku se charakterizuje pomocí směrodatné odchylky, protože směrodatná odchylka má stejný rozměr jako pozorovaný znak. [3]

### Charakteristiky šikmosti a špičatosti

Mezi tyto statistické charakteristiky, které charakterizují tvar hustoty pravděpodobnosti náhodné veličiny, patří koeficient šikmosti a koeficient špičatosti.

Koeficient šikmosti, resp. jeho znaménko je závislé na tom, na kterou stranu převažují odchylky od střední hodnoty a do jaké míry.

Koeficient špičatosti zase závisí na počtu odchylek od střední hodnoty. Pokud je větší než u normálního rozdělení pravděpodobnosti, je  $\gamma_2 > 0$ . V opačném případě je  $\gamma_2 < 0$ . Pro normální rozdělení platí, že je vždy  $\gamma_2 = 0$ .

### 2.3.2. Test dobré shody pro ověření normálního rozdělení

Z charakteru dat se dalo usuzovat, že by se mohlo jednat o soubor dat řídící se normálním rozdělením. Proto je potřeba v následujících řádcích definovat, jakým způsobem se testuje, zda-li se daný soubor dat řídí tímto rozdělením.

Nechť  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  je náhodný výběr velkého rozsahu ( $n > 100$ ) ze spojitého rozdělení s neznámou distribuční funkcí  $F$  a necht'  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  je jeho realizace. Budeme testovat hypotézu

$$H_0 : F = F_0 \text{ proti alternativní hypotéze } H_1 : F \neq F_0,$$

kde  $F_0$  je distribuční funkce normálního rozdělení.

Postupuje se následujícím způsobem. Hodnoty  $x_1, x_2, \dots, x_n$  roztřídíme do  $r$  disjunktních intervalů  $(-\infty; a_1), \langle a_1; a_2 \rangle, \dots, \langle a_{r-1}; \infty$  a zjistíme jejich četnosti  $f_1, f_2, \dots, f_r$ . Předpokládejme, že hypotéza  $H_0$  platí. Potom  $p_i = P(X \in \langle a_{i-1}, a_i \rangle) = F_0(a_i) - F_0(a_{i-1})$  je očekávaná pravděpodobnost, že naměřená hodnota znaku  $X$  padne do  $i$ -tého intervalu. Z  $n$  naměřených hodnot znaku  $X$  by tedy do  $i$ -tého intervalu mělo teoreticky padnout  $np_i$  hodnot,  $i = 1, 2, \dots, r$ . Předpokládáme, že  $np_i \geq 5$ ,  $i = 1, 2, \dots, r$ . Porovnááme empirické a teoretické četnosti.

Hypotézu  $H_0$  zamítáme v případě, že rozdíly  $f_i - np_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, r$  jsou velké. Vhodným testovacím kritériem je statistika

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(f_i - np_i)^2}{np_i}. \quad (3)$$

Statistika  $\chi^2$  má rozdělení  $\chi^2(r-1)$  pro  $n \rightarrow \infty$  za předpokladu, že všechny parametry distribuční funkce  $F_o$  jsou známé. S každým odhadovaným parametrem distribuční funkce  $F_o$  odpočítáme jeden stupeň volnosti. Pokud bodově odhadneme  $s$  parametrů, bude mít statistika  $\chi^2$  rozdělení  $\chi^2(r-s-1)$ .

Jestliže při testování normality základního souboru odhadujeme parametry  $\mu$  a  $\sigma^2$ , statistika  $\chi^2$  bude mít rozdělení  $\chi^2(r-3)$ . Navíc, pokud pro některé  $i$  není splněn předpoklad  $np_i \geq 5$ , odpočítáme za toto nesplnění jeden stupeň volnosti. Druhou možností je „problematický“ interval sloučit s některým jeho sousedním intervalem tak, aby podmínka  $np_i \geq 5$  byla splněna pro všechny intervaly. Kritickým oborem pro nulovou hypotézu je množina

$$W_\alpha = (\chi_\alpha^2(r-s-1), \infty). \quad (4)$$

Testovanou hypotézu  $H_0$  zamítáme na hladině významnosti  $\alpha$ , když  $\chi^2 \in W_\alpha$ . [3]

### 2.3.3. Korelační koeficient

Aby bylo možné posoudit vzájemnou závislost dat, jež byla naměřena různými typy snímačů, je potřeba uvést vztah pro korelační koeficient, který tuto závislost popisuje.

Vypočítá se podle následujícího vztahu:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (5)$$

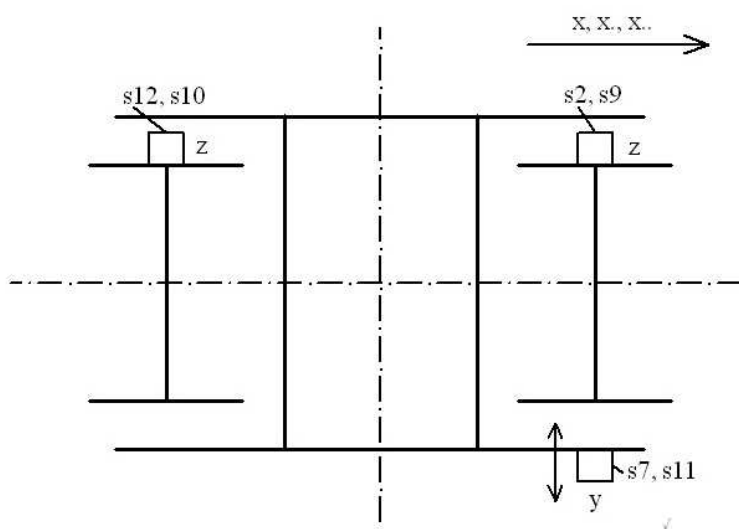
Hodnota korelačního koeficientu pochází z intervalu  $\langle -1; 1 \rangle$ , přičemž při  $r_{XY} = -1$  je mezi  $X$  a  $Y$  nepřímá lineární závislost, při  $r_{XY} = 1$  je naopak mezi  $X$  a  $Y$  přímá lineární závislost a pokud  $r_{XY} = 0$ , jsou  $X$  a  $Y$  lineárně nezávislé.

### 3. Statistické zpracování naměřených dat

Předchozí kapitoly se zabývaly teoretickými předpoklady pro statistické zpracování dat. Tato a následující kapitoly se již budou zabývat samotným statistickým vyhodnocováním dat a porovnáváním jejich statistických charakteristik. Nejdříve je však potřeba uvést několik základních informací týkajících se samotného měření a měřicí techniky.

#### 3.1. Zdroj dat, podmínky a úseky měření

Měření probíhalo několik dní na měřicím voze s podvozkem GP 200, na němž byly trvale upevněny jednotlivé snímače. Pro potřeby této práce byly dány k dispozici data ze šesti snímačů umístěných na třech měřicích místech, což je schematicky znázorněno na **obr. 10**.



**Obr. 10** Schematické znázornění umístění snímačů na podvozku měřicího vozu

V **tab. 1** je zobrazen seznam všech datových souborů z vyhodnocovaného měření, jež probíhalo v přímé trati.

**Tab. 1** Měření v přímé trati

Rychlost	Měření	Traťový úsek		Stav trati	Čas měření	
120 km/h	M05	Praha Klánovice	Praha Běchovice	nemodernizovaná trať	1405	1430
	M23	Česká Třebová	Třebovice v Čechách	nemodernizovaná trať	230	265
140 km/h	M05	Český Brod	Úvaly	modernizovaná trať	1095	1125
	M19	Podivín	Zaječí	modernizovaná trať	595	630
	M13	Rohatec	Moravský Písek	modernizovaná trať	1005	1040
160 km/h	M01	Podivín	Zaječí	modernizovaná trať	595	630
	M03	Zámorsk	Uhersko	modernizovaná trať	1420	1455

	M05	Velim	Pečky	modernizovaná trať	355	390
--	-----	-------	-------	--------------------	-----	-----

V **tab. 2** je zobrazen seznam všech datových z vyhodnocovaného měření, jež probíhalo v oblouku.

**Tab. 2** Měření v oblouku

Poloměr	Měření	Traťový úsek		Stav trati	Čas měření	
431 m	M03	Ústí nad Orlicí	Choceň	nemodernizovaná trať	645	680
418 m	M03	Ústí nad Orlicí	Choceň	nemodernizovaná trať	750	801
521 m	M03	Ústí nad Orlicí	Choceň	nemodernizovaná trať	808	843
366 m	M03	Ústí nad Orlicí	Choceň	modernizovaná trať	1093	1118
288 m	M20	Brno	Adamov	modernizovaná trať	1111	1130
275 m	M20	Adamov	Blansko	modernizovaná trať	1412	1429
466 m	M20	Adamov	Blansko	modernizovaná trať	1448	1462

Název každého datového souboru je pak odvozen od názvu měření a od času, ve kterém byl změřen (např. M03\_645-680).

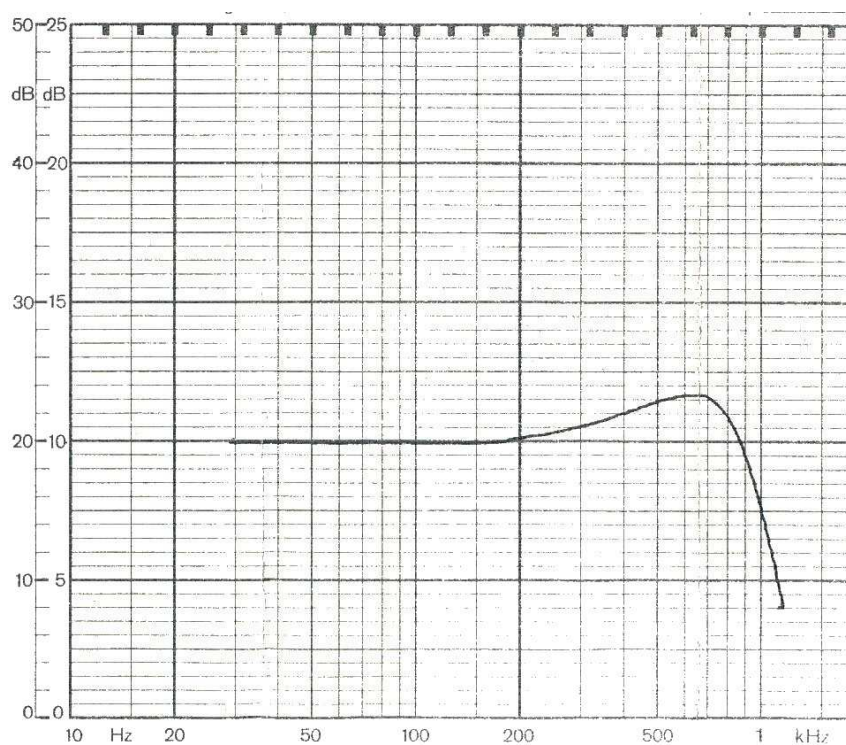
### 3.2. Měřicí technika

V **tab. 3** jsou základní údaje o snímačích. V kolonce označení je označení snímače pouze pro potřebu měření, které bylo převzato také pro potřebu vyhodnocení.

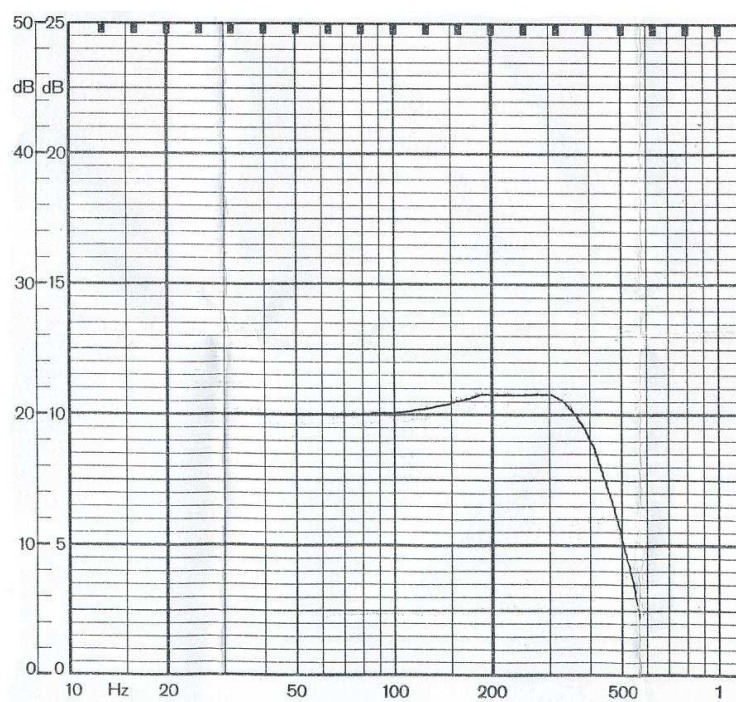
**Tab. 3** Typy snímačů a doplňující údaje

Snímač	Typ	Označení	Směr	Umístění
B12/1000	Indukčnostní	s2	svislý	přední ložisková skříň
Ki piezo	Piezoelektrický	s9	svislý	přední ložisková skříň
B12/500	Indukčnostní	s12	svislý	zadní ložisková skříň
Ki piezo	Piezoelektrický	s10	svislý	zadní ložisková skříň
B12/200	Indukčnostní	s7	příčný	rám podvozku
Ki piezo	Piezoelektrický	s11	příčný	rám podvozku

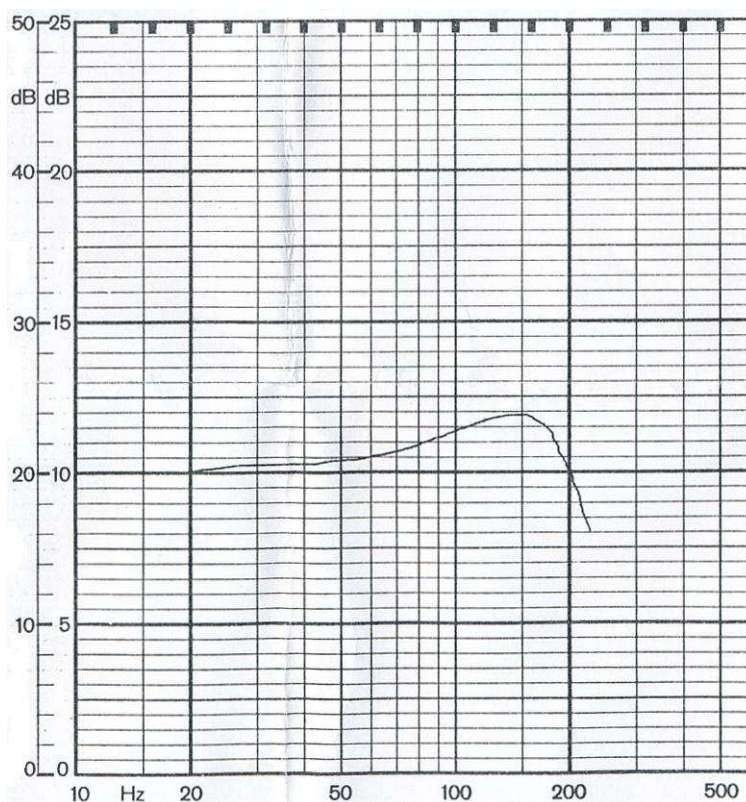
Z předchozích informací tedy vyplývá, že na jednom měřicím místě se nacházely dva snímače různého typu, a to indukčnostní a piezoelektrický. Dále pak také, že měření probíhalo jednak ve svislém, ale i v příčném směru zrychlení. Na následujících obrázcích jsou znázorněny frekvenční charakteristiky jednotlivých snímačů přímo od výrobce.



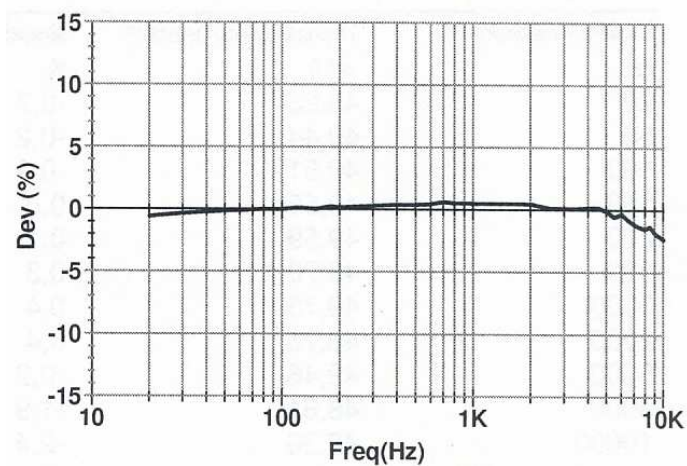
**Obr. 11** Frekvenční charakteristika snímače B12/1000 (s2)



**Obr. 12** Frekvenční charakteristika snímače B12/500 (s12)



**Obr. 13** Frekvenční charakteristika snímače B12/200 (s7)



**Obr. 14** Frekvenční charakteristika piezoelektrického snímače Kistler 8702B100 (s9, s10 a s11)

### 3.3. Postup při vyhodnocování dat

Výstupem z měření byly datové soubory s navzorkovaným signálem se vzorkovací frekvencí 1200 Hz. Ovšem vzhledem k tomu, že u každého snímače dochází od určité frekvence k odchylce mezi skutečnou a naměřenou hodnotou, jak je též patrné z jejich frekvenčních charakteristik, bude nutné nejdříve tato data zfiltrvat filtrovacím programem.

Teprve poté může dojít k samotnému vyhodnocení dat a tím pádem k získání základních statických charakteristik a ověření normality. Aby bylo možné zhodnotit vliv filtrace, budou také za účelem porovnání vyhodnocena nefiltrovaná data.

Poté dojde k porovnání statistických charakteristik mezi snímači v jednotlivých měřicích místech, to znamená, že se budou sledovat rozdíly mezi charakterem dat z indukčnostního a z piezoelektrického snímače. K měření zrychlení na železničních vozidlech se totiž zpravidla používá indukčnostní typ snímače. V této části práce se ukáže, zda-li je možné použít také snímač piezoelektrický.

Posledním úkolem bude porovnat data z jednotlivých traťových úseků mezi sebou. Bude se zkoumat závislost vybrané statistické charakteristiky na rychlosti u úseků v přímé koleji a úseků v oblouku se bude zkoumat závislost na poloměru oblouku. Také bude potřeba zohlednit, jestli se jedná o trať, na které již proběhla rekonstrukce, nebo ne.

Mezi sebou budou vždy porovnávána data ze snímačů umístěných na stejném měřicím místě, jako doplněk je pak uvedeno v této práci v kapitole 7.4 porovnání dvou piezoelektrických snímačů měřících zrychlení ve svislém směru, z nichž je první, jak již bylo výše uvedeno, umístěn na přední ložiskové skříni ve směru jízdy (s9) a druhý na zadní ložiskové skříni ve směru jízdy (s10).

Každý ze tří indukčnostních snímačů má rozdílnou charakteristiku, naopak všechny tři piezoelektrické snímače mají stejnou charakteristiku, proto bylo potřeba provést dva typy filtrace – s dolní propustí a s pásmovou propustí. Nejdříve však byla vyhodnocena data před filtrací, aby bylo možné později porovnat, jaký má filtrace, ať už s dolní propustí, nebo s pásmovou propustí, vliv na jednotlivé statistické charakteristiky.

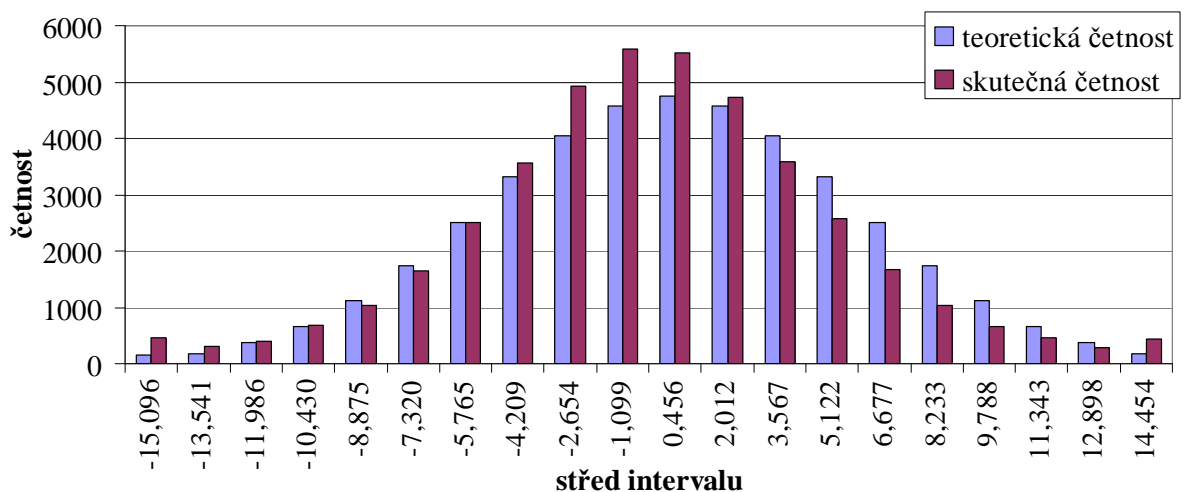
Na základě toho se pak vybral jeden z těchto typů filtrace dat, se kterým se pak dále v této práci pracovalo zejména při porovnávání dat z jednotlivých jízd, a také pro korelační koeficient mezi daty z indukčnostního a piezoelektrického snímače.

## 4. Vliv filtrace na vyhodnocená data

Nejprve došlo ke zpracování a vyhodnocení nefiltrovaných dat. Veškeré výpočty a statistická vyhodnocení byly provedeny v programu MS Excel 2003. Jako první bylo potřeba vynásobit veškerá data vždy u jednoho z dvojice snímačů z jednoho měřicího místa -1 a to z toho důvodu, že se snímače na měřicím místě nacházely proti sobě, to znamená, že data ze snímačů měla opačná znaménka. Tento krok byl proveden u dat z piezoelektrických snímačů.

Následně mohla být data zpracována. Hodnoty se uspořádaly od první hodnoty  $x_1$  až po  $n$ -tou hodnotu  $x_n$ . Z uspořádaných dat byl nejprve určen aritmetický průměr. Poté došlo k vycentrování dat a na základě teoretických znalostí a za pomoci statistických funkcí byly stanoveny jednotlivé statistické charakteristiky, mezi nich patří 0.15 %, 2.5 %, 97.5 % a 99.85 % kvantil, medián, směrodatná odchylka, minimum a maximum, pro ilustraci pak ještě koeficient šikmosti a špičatosti, z nichž největší význam bude v této práci kladen na směrodatnou odchylku. Dále pak budou v určitých kapitolách prezentovány některé kvantily.

Následně byla data roztříděna do dvaceti tříd. V každé třídě se za pomoci statistické funkce určila hodnota teoretické distribuční funkce. Na základě teoretické distribuční funkce byla získána teoretická pravděpodobnost jednotlivých tříd (tak, že od hodnoty distribuční funkce v následující třídě se odečetla hodnota distribuční funkce ve třídě, v níž byla dopočítávána hodnota teoretické pravděpodobnosti) a z ní po vynásobení počtem dat byla získána teoretická četnost v každé z dvaceti tříd. Skutečná četnost v každé třídě byla spočítána za pomoci statistické funkce.



**Obr. 15** Ukázka histogramu skutečné a teoretické četnosti

Porovnání skutečné a teoretické četnosti dat ze snímače s7 datového souboru M03\_645-680 je zobrazeno v **obr. 15**. Hodnoty teoretické četnosti ukazují, jaký by daný soubor dat měl



mít charakter v případě, že by se mělo jednat o soubor dat řídicí se normálním rozdělením. Hodnoty skutečné četnosti zase ukazují, jaký charakter má daný soubor ve skutečnosti.

Poté bylo ověřeno, zda-li se jedná nebo nejedná o soubor z normálního rozdělení. Použitím testu dobré shody byla testována hypotéza na 0,05 % hladině spolehlivosti

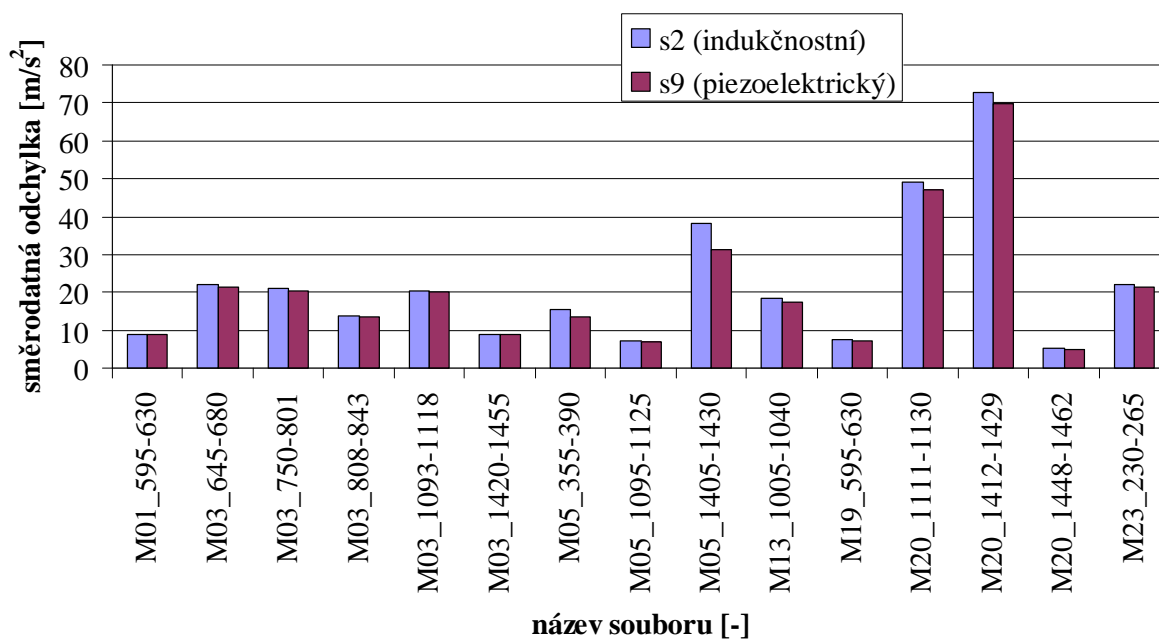
$H_0$ : Jedná se o soubor z normálního rozdělení.

proti hypotéze

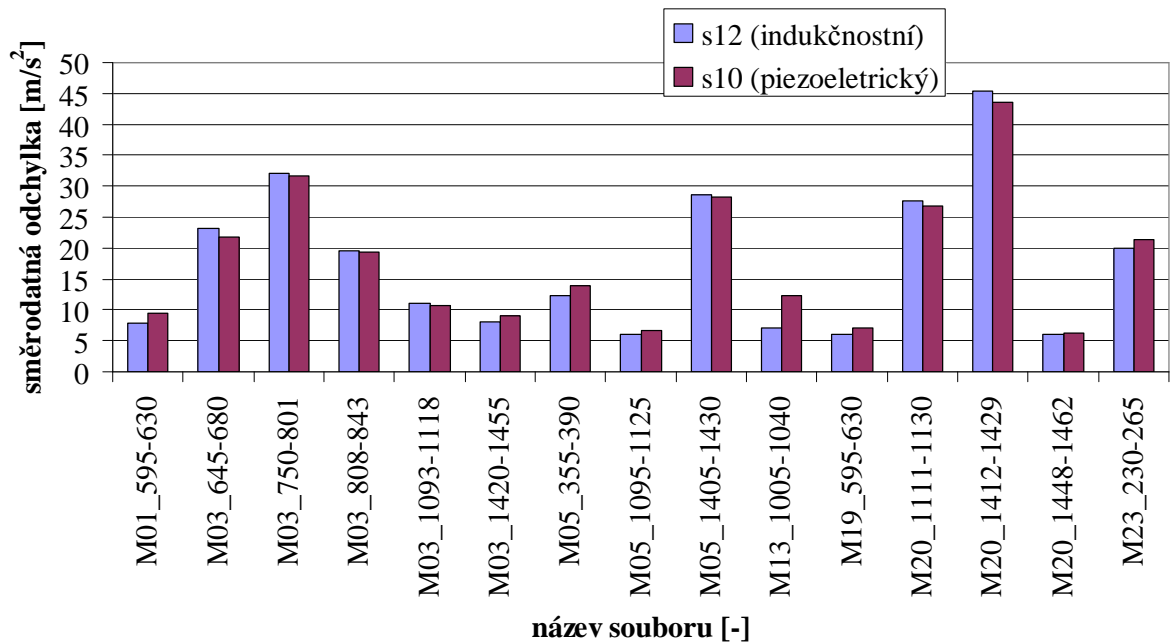
$H_1$ : Nejedná se o soubor z normálního rozdělení.

Výsledek byl takový, že ani u jednoho ze souborů nepadla hodnota testovacího kritéria pod kritickou hodnotu, tudíž byla zamítnuta hypotéza  $H_0$ .

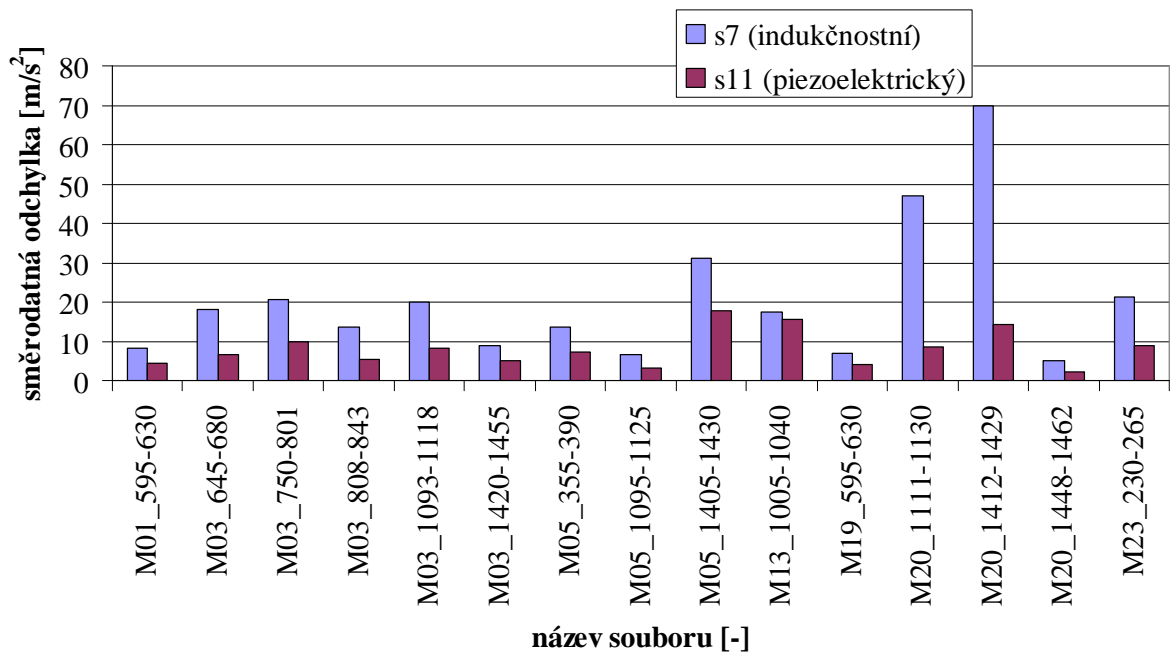
Na základě výsledků, jež byly získány z dat při vyhodnocování v MS Excel 2003, bylo možné přistoupit k porovnání vyhodnocených dat. Jak už bylo výše zmíněno, v této práci bude při porovnávání ať už jednotlivých snímačů, nebo úseků kladen největší důraz na směrodatnou odchylku, a to zejména proto, že ta na rozdíl od histogramu četností jednoduchým způsobem vhodně popisuje rozčlenění dat okolo aritmetického průměru, na rozdíl od aritmetického průměru lze s výhodou určit procentuální rozdíl mezi dvěma směrodatnými odchylkami a neprojeví se na její hodnotě kvazistatická složka, kdežto u aritmetického průměru ano, zejména u indukčních snímačů.



**Obr. 16** Porovnání směrodatných odchylek z nefiltrovaných dat u snímačů ve svislém směru na přední ložiskové skříni



**Obr. 17** Porovnání směrodatných odchylek z nefiltrovaných dat u snímačů ve svislém směru na zadní ložiskové skříni



**Obr. 18** Porovnání směrodatných odchylek z nefiltrovaných dat u snímačů na rámu podvozku v příčném směru

Na obr. 16, obr. 17 a obr. 18 jsou na ukázkou zobrazeny směrodatné odchylky všech souborů ještě před filtrováním dat. Mezi některými ze směrodatných odchylek, zejména v příčném směru, je dost podstatný rozdíl, což se ale změnilo po následné filtraci.

K filtraci s dolní propustí bylo nutné přikročit kvůli charakteristikám indukčnostních snímačů. Protože byla charakteristika každého z vyhodnocovaných indukčnostních snímačů rozdílná, byly rozdílné i frekvence, jimiž se filtrovalo v dolní propusti. Vzhledem k tomu, že byla porovnávána mezi sebou data ze dvou snímačů, indukčnostního a piezoelektrického, bylo potřeba zfiltrovat také data piezoelektrického snímače, a to stejnou filtrační frekvencí v dolní propusti jako u indukčnostního snímače, s nímž měl být daný piezoelektrický snímač porovnáván. Pokud se mají porovnávat data ze dvou snímačů, musí být jejich data zfiltrována stejným způsobem a stejnou frekvencí.

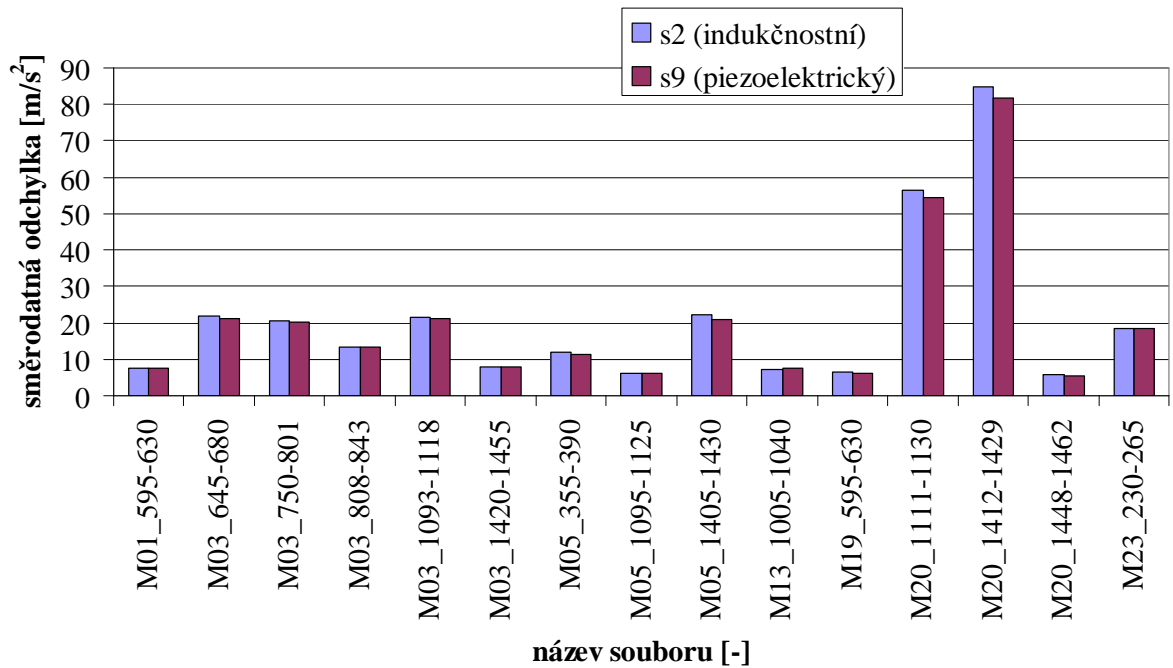
V **tab. 4** jsou zobrazeny filtrační frekvence dolní propusti, jimiž byla filtrována data z uvedených snímačů.

**Tab. 4** Snímače a filtrační frekvence

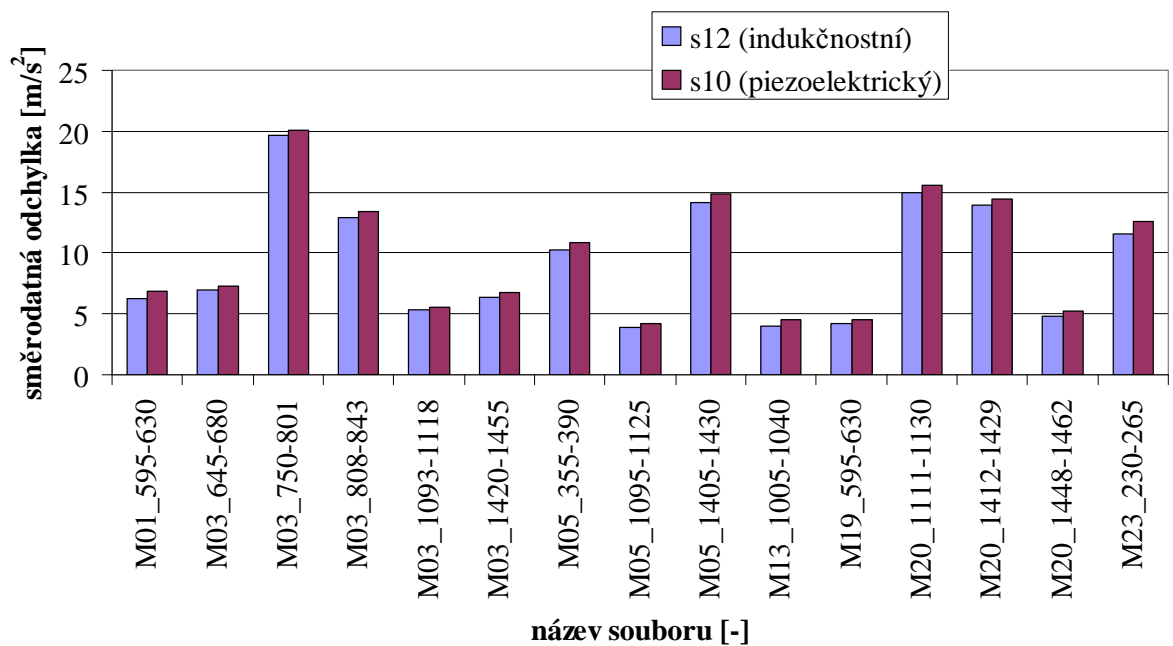
Snímač	Označení	Filtr
B12/1000	s2	350 Hz
Ki piezo	s9	350 Hz
B12/500	s12	150 Hz
Ki piezo	s10	150 Hz
B12/200	s7	75 Hz
Ki piezo	s11	75 Hz

Data byla zfiltrována filtračním programem, který je k dispozici na Dislokovaném pracovišti v České Třebové. Následně bylo potřeba odstranit prvních 5 sekund datového záznamu u každého souboru z důvodu počátečního zkreslení filtračním programem. Při vyhodnocování bylo postupováno stejně jako u nefiltrovaných dat. Na základě testu dobré shody byla opět zamítnuta hypotéza  $H_0$ .

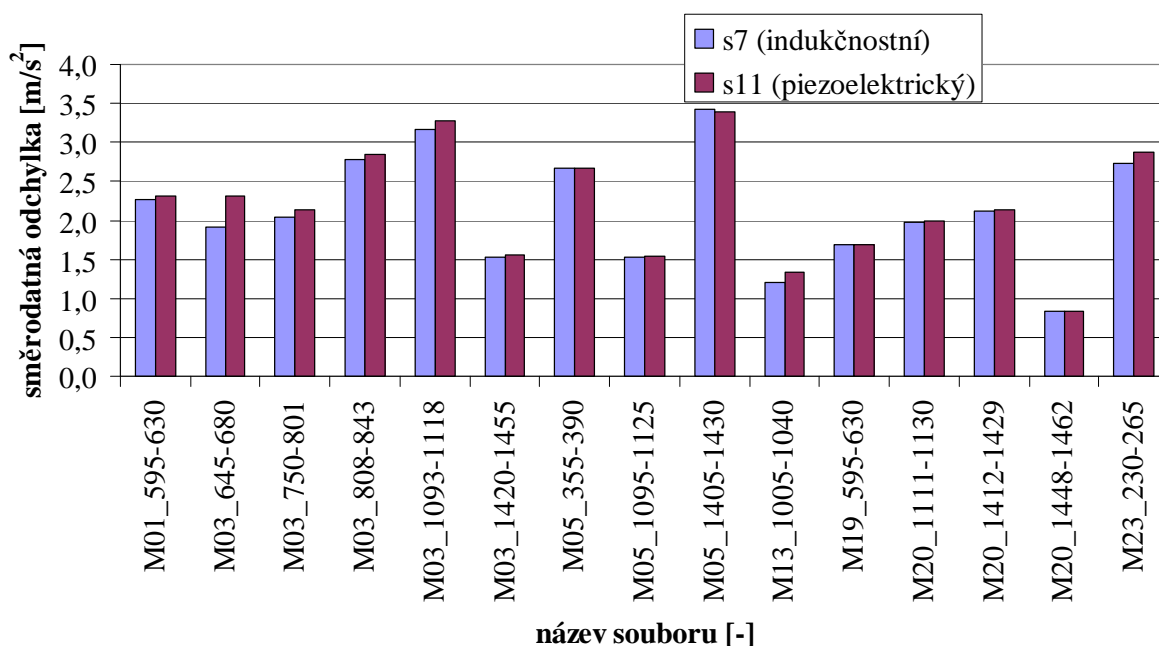
Jako hlavní statistická charakteristika při porovnání opět poslouží směrodatná odchylka.



*Obr. 19 Porovnání směrodatných odchylek z dat filtrovaných dolní propustí u indukčnostního a piezoelektrického snímače*



*Obr. 20 Porovnání směrodatných odchylek z dat filtrovaných dolní propustí u indukčnostního a piezoelektrického snímače*



**Obr. 21** Porovnání směrodatných odchylek z dat filtrovaných dolní propustí u indukčnostního a piezoelektrického snímače

Na **obr. 19**, **obr. 20** a **obr. 21** jsou porovnávány směrodatné odchylky indukčnostních a piezoelektrických snímačů. Je zřejmé, že na rozdíl od směrodatných odchylek z dat před filtrací jsou mezi směrodatnými odchylkami dat po filtraci podstatně menší rozdíly. Procentuální srovnání je provedeno v následující kapitole.

Na základě vyhodnocení filtrovaných dat s dolní propustí a nefiltrovaných dat může dojít ke srovnání jejich statistických charakteristik a průběhů dat. Pro ilustraci postačí ukázka srovnání statistických charakteristik dat jednoho snímače v jednom měřicím úseku.

**Tab. 5** Statistické charakteristiky před a po filtraci u dat ze souboru M05\_355-390 pro snímač s7

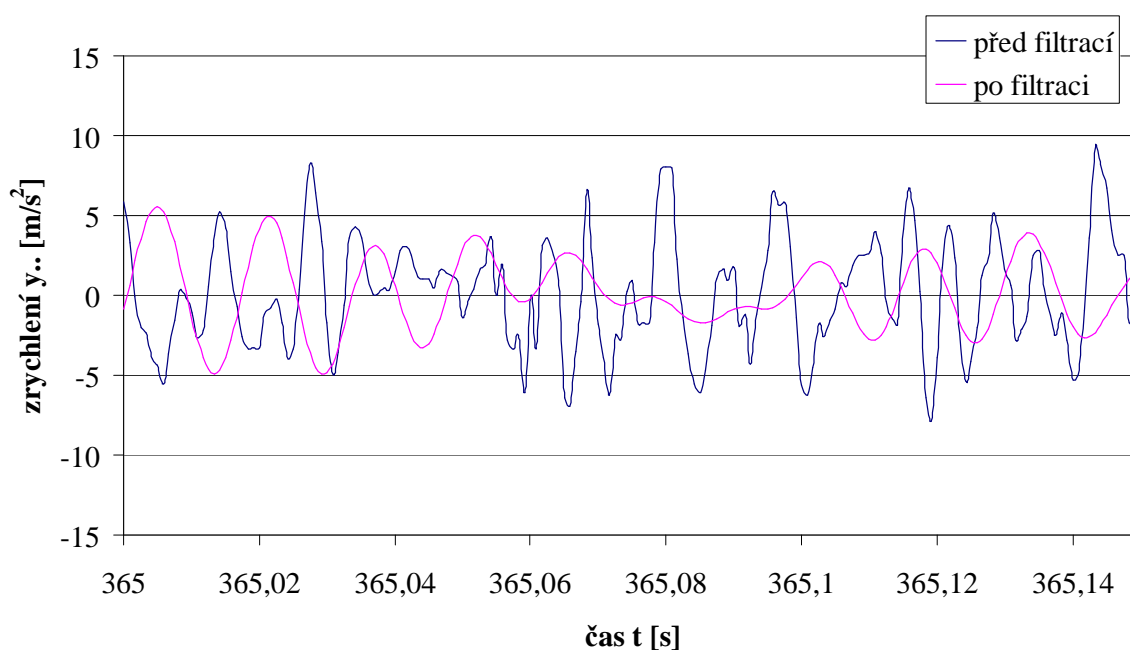
Statistické charakteristiky	před filtrací	po filtraci	%
Počet dat	36000	36000	0%
0.15% kvantil	-12,413	-8,210	34%
2.5% kvantil	-7,364	-5,271	28%
Medián	-0,015	-0,008	47%
97.5% kvantil	7,423	5,279	29%
99.85% kvantil	12,083	8,006	34%
Směrodatná odchylka	3,761	2,662	29%
Minimum	-19,782	-11,012	44%
Maximum	20,289	10,597	48%
Aritmetický průměr	0,000	0,000	0%
Koeficient šikmosti	0,001	-0,009	1000%

<b>Koeficient špičatosti</b>	0,473	0,151	68%
------------------------------	-------	-------	-----

V tabulce jsou znázorněny hodnoty před a po filtraci s dolní propustí. Ve třetím sloupci je pak jejich procentuální rozdíl. Protože se u filtrovaných souborů kvůli počátečnímu zkreslení filtrovacím program ořezávalo prvních 5 sekund, bylo nutné totéž udělat pro potřebu porovnání mezi daty před filtrací a po filtraci s dolní propustí u nefiltrovaných dat. Tím se u nefiltrovaných dat taktéž zmenšil počet dat ze 42 000 na 36 000.

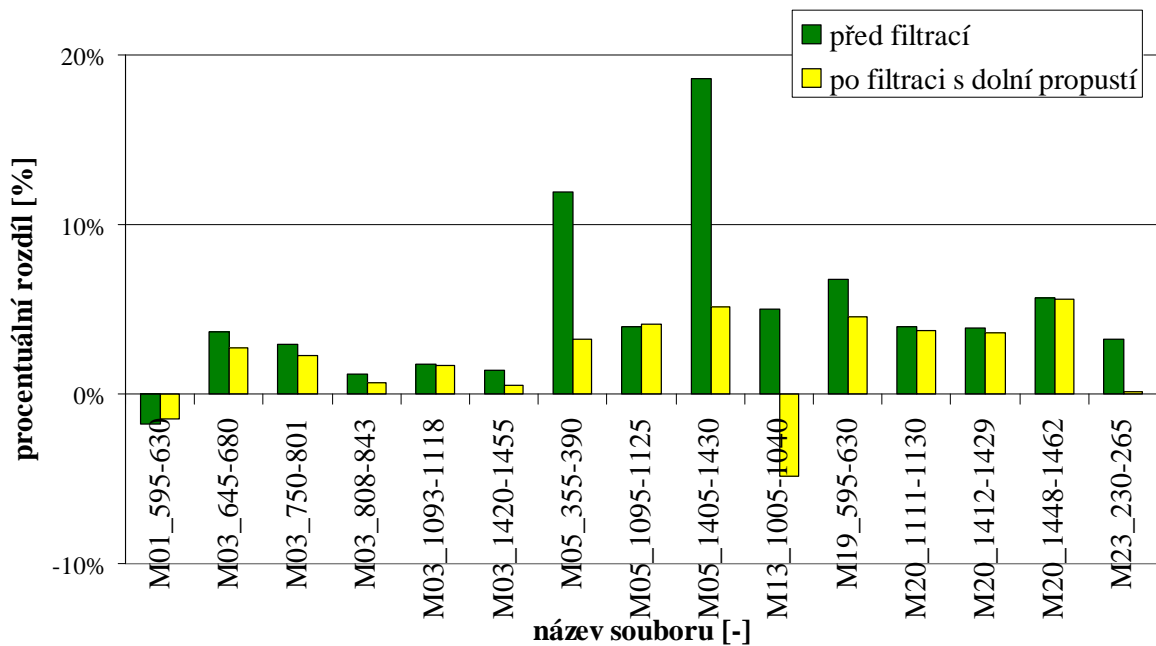
Odfiltrováním vyšších frekvencí se hodnoty kvantilů 0.15 % a 2.5 % zvýšily asi o 30 %, naopak hodnoty kvantilů 97.5 % a 99.85 % se snížily asi o 30 %. Taktéž směrodatná odchylka se snížila o necelých 30 %. Aritmetický průměr se nezměnil. Maximum, resp. minimum se snížilo, resp. zvýšilo asi o 45 %.

Na **obr. 22** je vidět rozdíl v průbězích dat před a po filtraci ještě před vycentrováním v rámci vybraného časového úseku 0.15 sekundy. Na první pohled je patrná vyšší frekvence nefiltrovaných dat na rozdíl od dat filtrovaných.



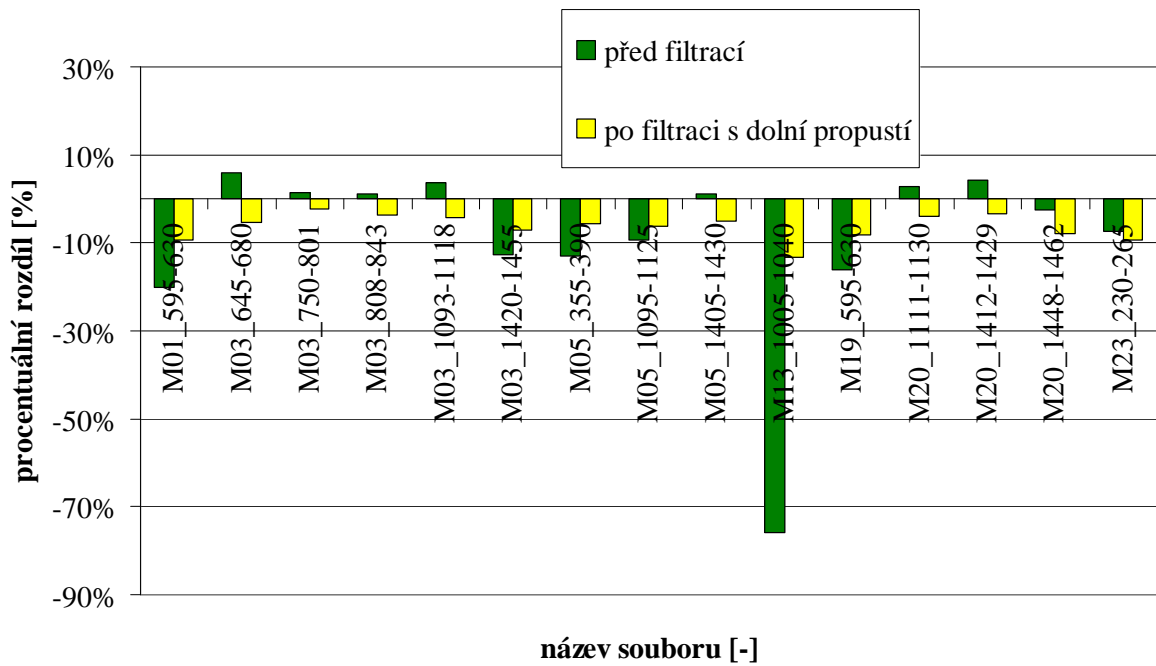
**Obr. 22** Porovnání průběhů dat před a po filtraci u snímače s7 ze souboru M05\_355-390

Pro tuto práci je nejpodstatnější statistickou charakteristikou směrodatná odchylka. Proto je na místě, aby byly zobrazeny procentuální rozdíly mezi směrodatnou odchylkou před filtrací a po filtraci s dolní propustí.



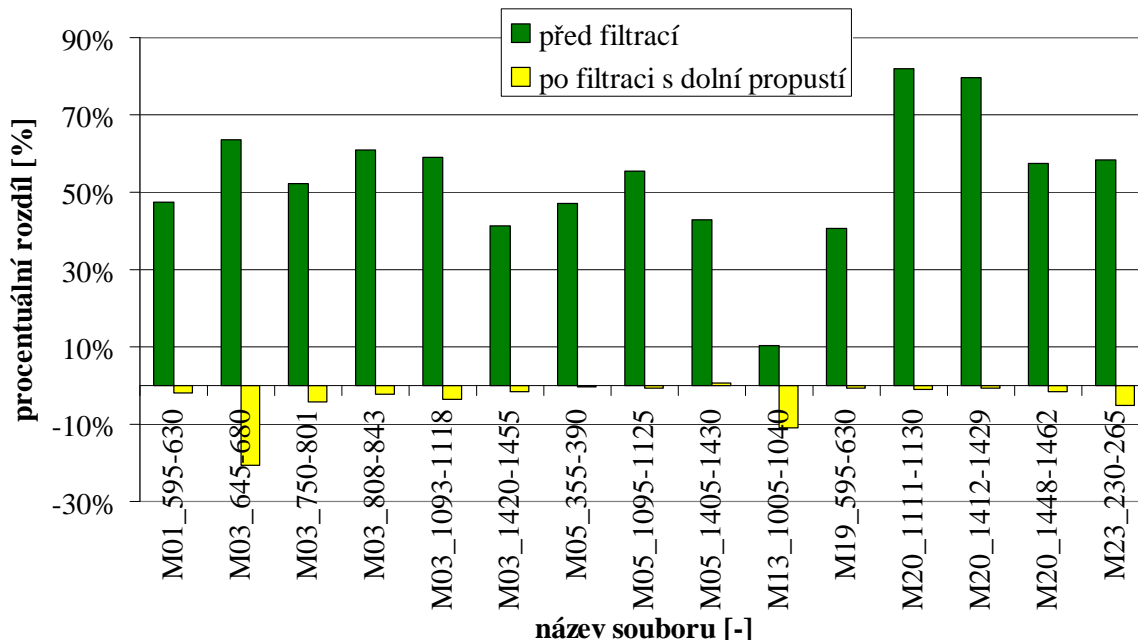
*Obr. 23 Porovnání procentuálních rozdílů mezi směrodatnými odchylkami snímačů s2 a s9 před a po filtraci (svislý směr)*

Z obr. 23 je zřejmé, že procentuální rozdíl směrodatných odchylek u dat ze snímačů s2 a s9 klesl, a to v průměru u všech souborů z 5 % na 2 %.



*Obr. 24 Porovnání procentuálních rozdílů mezi směrodatnými odchylkami snímačů s10 a s12 před a po filtraci (svislý směr)*

U dat ze snímačů s10 a s12 se průměrný procentuální rozdíl jejich směrodatných odchylek změnil z -9% na -6 % (viz **obr. 24**).



**Obr. 25** Porovnání procentuálních rozdílů mezi směrodatnými odchylkami snímačů s7 a s11 před a po filtraci (příčný směr)

A nakonec u dat ze snímačů s7 a s11 byl procentuální rozdíl mezi směrodatnými odchylkami před filtrací největší – průměrně asi 53 % Po filtraci pak klesl na -3 %, což může být dáno tím, že byly filtrovány nejnižší frekvencí, tudíž u indukčního snímače docházelo při vyšších frekvencích, které byly později odfiltrovány, k velkému zkrácení.



## 5. Vliv typu filtru na vyhodnocená data

Vzhledem k frekvenční charakteristice piezoelektrického snímače bylo nutno provést filtraci s pásmovou propustí, která měla ověřit, k jaké chybě dochází u piezoelektrického snímače ve statistických charakteristik při ponechání nízkofrekvenčních složek.

Filtrovány byly opět základní soubory stejným filtrovacím programem podle následující tabulky.

**Tab. 6** Tabulka jednotlivých snímačů a filtrovacích frekvencí

Snímač	Označení	Filtr
B12/1000	s2	1 - 350 Hz
Ki piezo	s9	1 - 350 Hz
B12/500	s12	1- 150 Hz
Ki piezo	s10	1 - 150 Hz
B12/200	s7	1 - 75 Hz
Ki piezo	s11	1 - 75 Hz

V tomto případě je filtrace v dolní hranici limitovaná charakteristikou piezoelektrických snímačů (všechny tři jsou stejné a mají stejné vlastnosti) a v horní hranici jednotlivými charakteristikami indukčnostních snímačů (B12/1000, B12/500 a B12/200).

Po provedení filtrace bylo třeba opět oříznout prvních 5 sekund datového záznamu z každého měřeného úseku ze stejného důvodu jako po filtraci s dolní propustí. Vlivem tohoto typu filtrace se odstranila kvazistatická složka, následkem čehož se aritmetické průměry všech souborů přiblížily k nule. Ve svislém směru se pohybovaly v rozmezí  $\langle -0,015; 0,005 \rangle$ , v příčném směru  $\langle -0,002; 0,002 \rangle$ . Poté došlo k vyhodnocení dat analogicky jako u předchozích případů. Hypotéza  $H_0$  o normálním rozdělení byla na hladině 0.05 % spolehlivosti zamítnuta.

Jako hodnotící kritérium daného souboru poslouží směrodatná odchylka. Při srovnávání směrodatných odchylek stejných snímačů ve svislém směru byly procentuální rozdíly do 0.1 %. V příčném směru byly procentuální rozdíly ve směrodatných odchylkách maximálně do 3 %, kromě snímače s11 opět ze souboru M03\_645-680, kde procentuální rozdíl činil skoro 16 %, absolutní rozdíl těchto dvou směrodatných odchylek se rovná hodnotě asi  $0.361 \text{ m/s}^2$ .

Z výše uvedeného plyne, že hodnoty statistických charakteristik se nijak výrazně nezměnily. Navíc při měření zrychlení na železničním vozidle se častěji používají indukčnostní snímače, v důsledku čehož lze považovat filtraci s dolní propustí za dostačující,

a proto se bude až na jednu výjimku v dalších kapitolách pracovat s daty filtrovanými dolní propustí.

## 6. Porovnání statistických charakteristik naměřených dat z různých typů snímačů

V této kapitole bude porovnáván na základě statistických charakteristik indukčnostní a piezoelektrický snímač. V případě svislého směru se bude jednat o pár snímačů na přední ložiskové skříně ve směru jízdy (B12/1000 a piezoelektrický) a na zadní ložiskové skříně ve směru jízdy (B12/500 a piezoelektrický), u příčného směru o pár B12/200 a piezoelektrický snímač umístěný na rámu podvozku.

Pro názornou ukázkou byla vybrána data ze souborů M05\_355-390, M20\_1448-1462 a M23\_230-265 proto, aby se v prvním případě ukázaly rozdíly při jízdě v přímé koleji rychlostí 160 km/h na modernizované trati, v druhém případě při jízdě v oblouku na modernizované trati a konečně ve třetím případě na nemodernizované trati při jízdě rychlostí 120 km/h.

### 6.1. Porovnání snímačů s2 a s9 (svislý směr; přední ložisková skříně ve směru jízdy)

Tab. 7 Tabulka statistických charakteristik

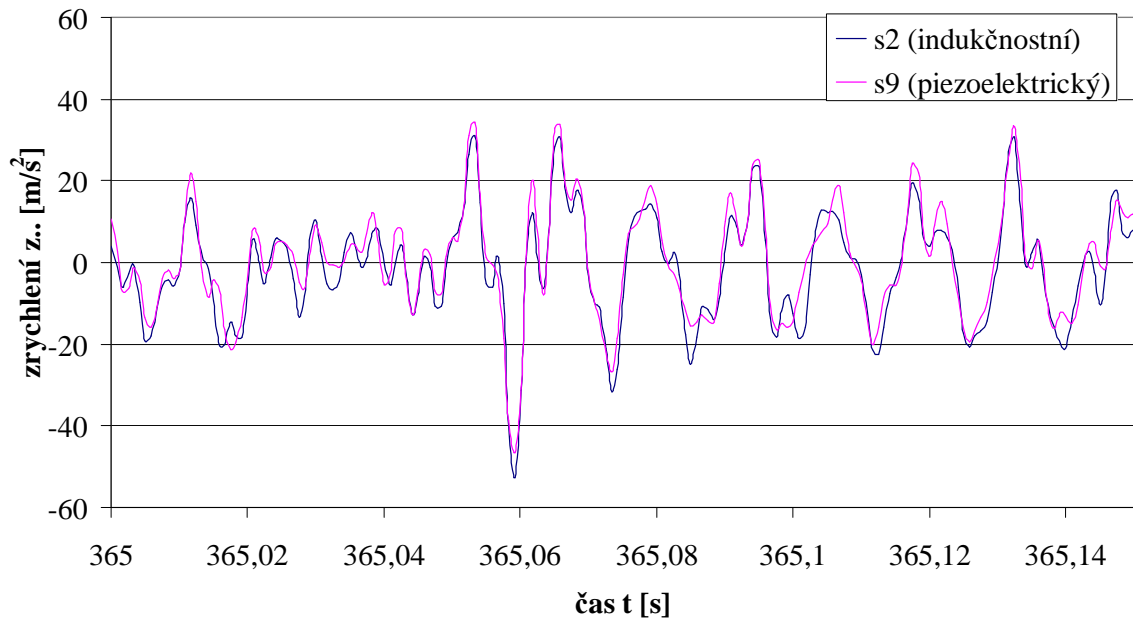
Soubor	M05_355-390		M20_1448-1462		M23_230-265	
Snímač	s2	s9	s2	s9	s2	s9
Počet dat	36000	36000	10800	10800	36000	36000
0.15% kvantil	-40,724	-40,188	-21,384	-20,061	-109,086	-109,902
2.5% kvantil	-22,647	-21,355	-10,924	-10,502	-35,560	-35,648
Medián	0,066	0,368	-0,017	-0,049	0,464	0,482
97.5% kvantil	22,550	21,960	11,794	11,098	33,223	33,269
99.85% kvantil	36,850	36,602	22,873	21,037	77,346	78,305
Směrodatná odchylka	11,821	11,437	5,772	5,322	18,363	18,331
Minimum	-100,250	-95,863	-36,846	-34,668	-192,840	-194,097
Maximum	83,099	79,089	36,877	31,835	178,237	182,606
Aritmetický průměr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Koeficient šikmosti	-0,135	-0,117	0,095	0,086	-0,798	-0,852
Koeficient špičatosti	1,194	1,036	1,759	1,609	8,901	9,419

V prvním případě se směrodatné odchylky liší asi o 3 %, kvantily, vyjma 2.5 % kvantilu, u kterého se jedná asi o 6 %, mají rozdíly do 3 %, maximum a minimum maximálně 5 %.

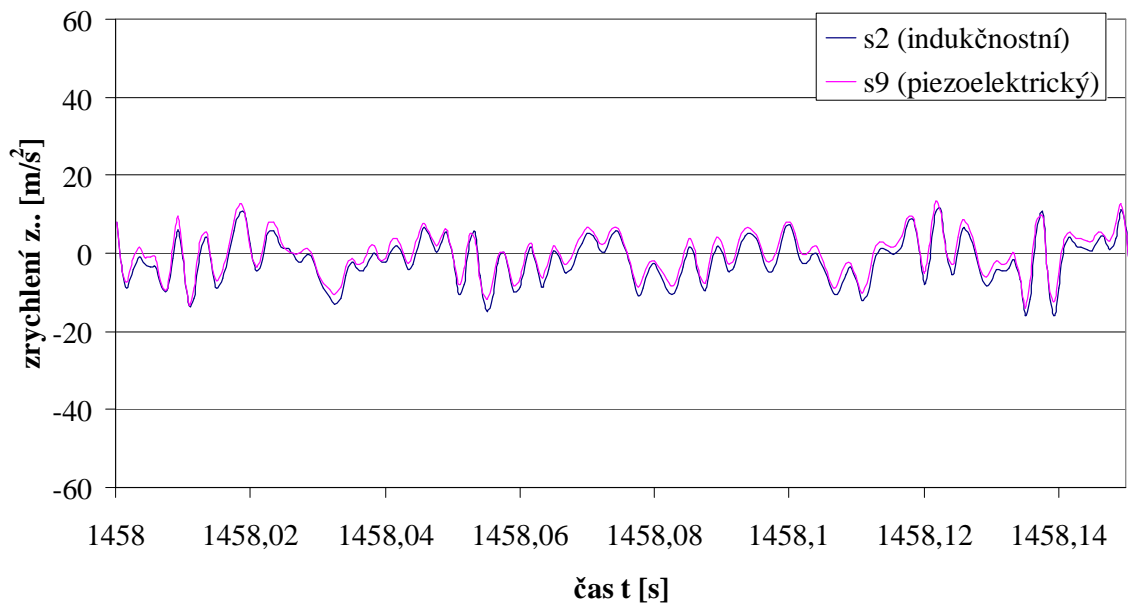
Ve druhém případě se směrodatné odchylky liší asi o 8 %. U kvantilů jsou rozdíly do 8 %, rozdíly mezi minimy jsou asi 6 % a mezi maximy jsou 14 %.

Ve třetím případě mají veškeré výše jmenované statistické charakteriky mezi sebou rozdíl do 3 %.

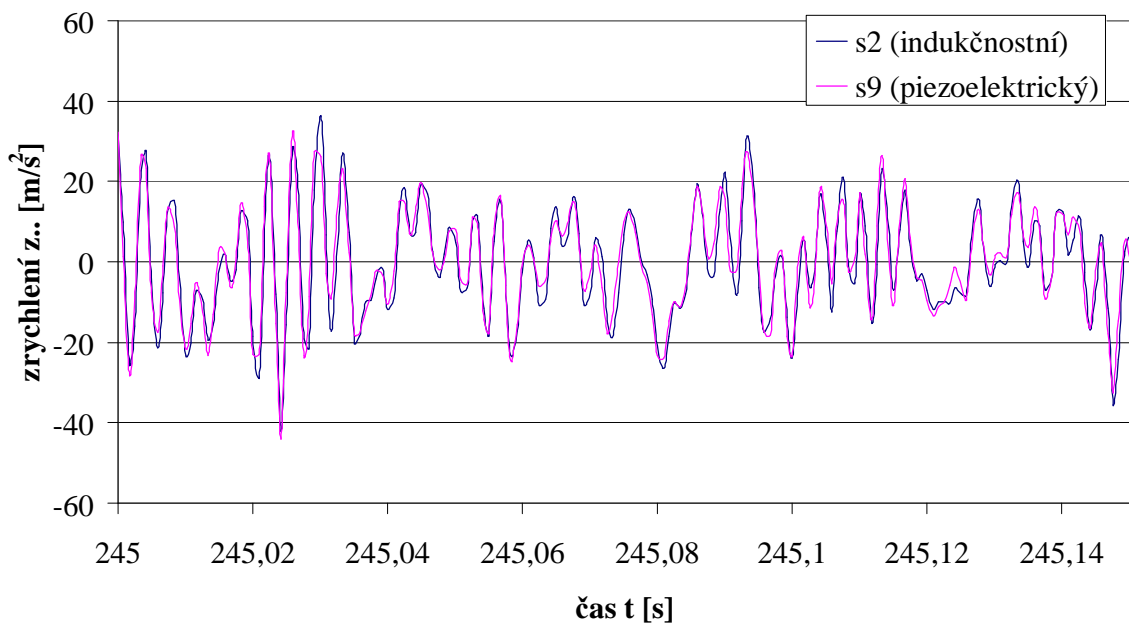
Na následujících obrázcích jsou na ukázkou zobrazeny průběhy nevycentrovaných dat ve vybraném časovém úseku 0.15 s z každého souboru.



**Obr. 26** Porovnání průběhů ve svislém směru u snímačů na přední ložiskové skříni



**Obr. 27** Porovnání průběhů ve svislém směru u snímačů na přední ložiskové skříni



Obr. 28 Porovnání průběhů ve svislém směru u snímačů na přední ložiskové skříni

## 6.2. Porovnání snímačů s12 a s10 (svislý směr; zadní ložisková skříň ve směru jízdy)

Tab. 8 Tabulka statistických charakteristik

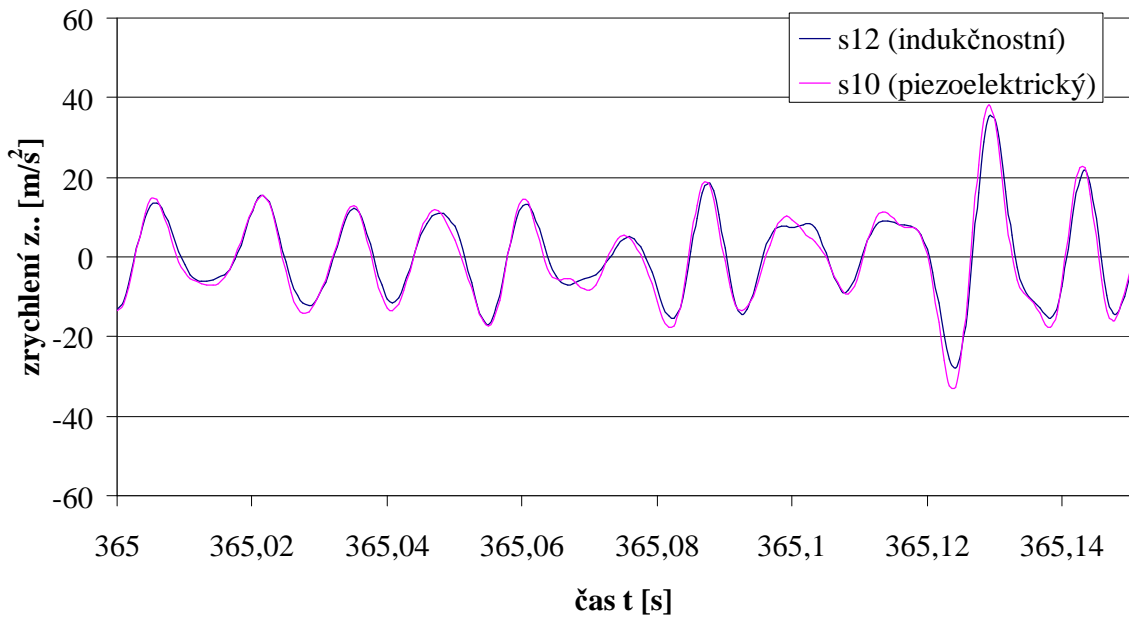
Soubor	M05_355-390		M20_1448-1462		M23_230-265	
Snímač	s12	s10	s12	s10	s12	s10
Počet dat	36000	36000	10800	10800	36000	36000
0.15% kvantil	-32,375	-34,612	-15,007	-15,929	-79,530	-87,700
2.5% kvantil	-18,254	-19,309	-9,245	-9,952	-21,571	-23,821
Medián	-0,075	-0,048	-0,030	-0,069	0,217	0,249
97.5% kvantil	18,818	19,964	9,091	9,758	20,286	22,329
99.85% kvantil	30,717	32,490	13,946	14,994	49,499	53,622
Směrodatná odchylka	10,250	10,821	4,865	5,255	11,544	12,622
Minimum	-78,355	-80,996	-20,838	-22,219	-119,301	-132,261
Maximum	49,570	54,278	17,570	18,594	114,405	124,193
Aritmetický průměr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Koeficient šikmosti	-0,047	-0,037	-0,034	-0,023	-1,181	-1,181
Koeficient špičatosti	0,254	0,179	-0,214	-0,247	12,413	12,449

V prvním případě je rozdíl mezi směrodatnými odchylkami asi 6 %, v dolních kvantilech i horních kvantilech okolo 6 %. Rozdíly mezi maximy a minimy jsou do 10 %.

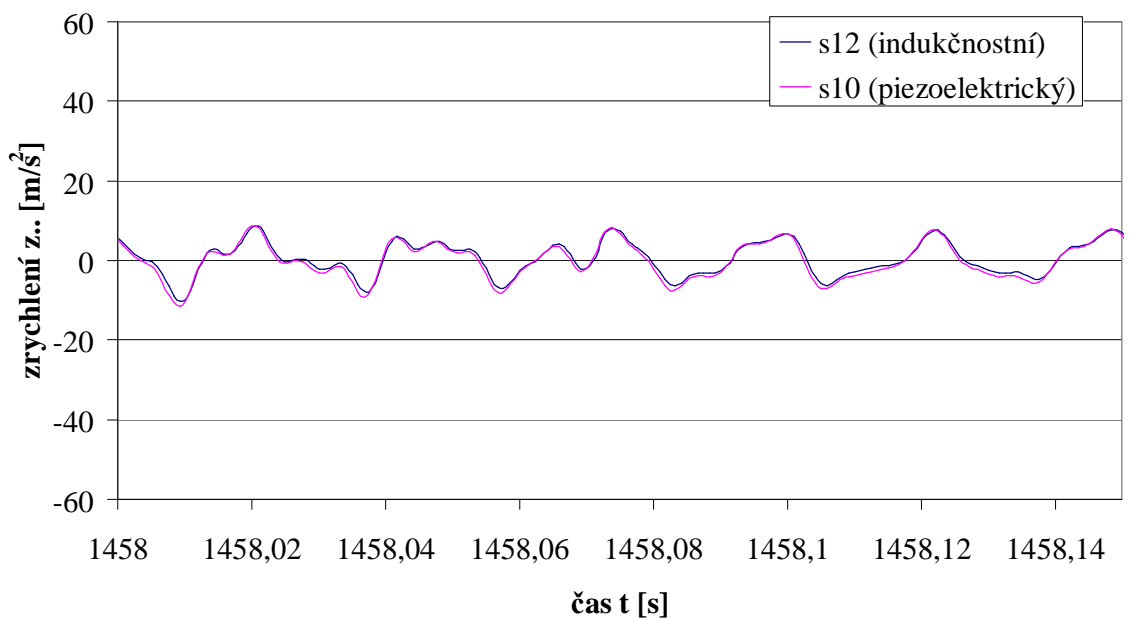
Ve druhém případě jsou veškeré rozdíly do 8 %.

A nakonec ve třetím případě jsou rozdíly na rozdíl od předchozího páru snímačů největší. Směrodatné odchylky se liší o 9 %, rozdíl mezi kvantily, maximy a minimy je do 11 %.

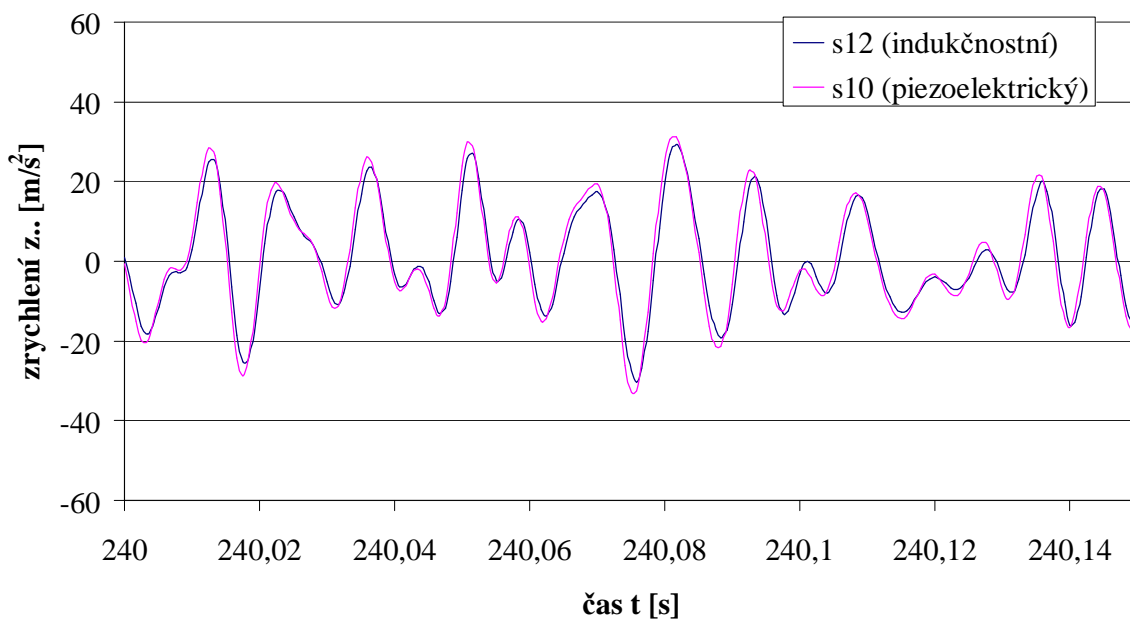
Na následujících obrázcích jsou na ukázkou zobrazeny průběhy nevycentrovaných dat ve vybraném časovém úseku 0.15 sekund z každého souboru.



*Obr. 29 Porovnání průběhů ve vvislém směru u snímačů na zadní ložiskové skříni*



*Obr. 30 Porovnání průběhů ve vvislém směru u snímačů na zadní ložiskové skříni*



Obr. 31 Porovnání průběhů ve svislém směru u snímačů na zadní ložiskové skříni

### 6.3. Porovnání snímačů s7 a s11 (příčný směr; rám podvozku)

Tab. 9 Tabulka statistických charakteristik

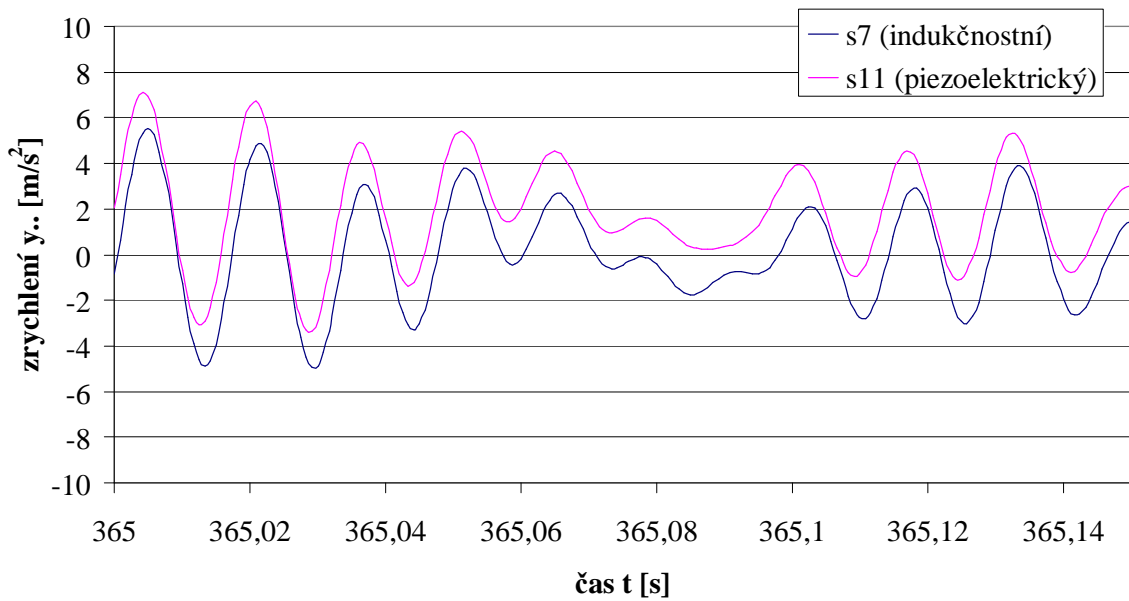
Soubor	M05_355-390		M20_1448-1462		M23_230-265	
Snímač	s7	s11	s7	s11	s7	s11
Počet dat	36000	36000	10800	10800	36000	36000
0.15% kvantil	-8,210	-8,296	-2,644	-2,693	-9,649	-10,491
2.5% kvantil	-5,272	-5,286	-1,631	-1,657	-5,523	-5,789
Medián	-0,008	0,005	-0,008	-0,002	0,019	0,008
97.5% kvantil	5,279	5,232	1,625	1,666	5,372	5,703
99.85% kvantil	8,006	7,940	2,467	2,403	9,087	9,446
Směrodatná odchylka	2,662	2,672	0,830	0,843	2,735	2,879
Minimum	-11,013	-11,622	-4,132	-4,187	-13,034	-13,777
Maximum	10,597	10,696	3,395	3,508	15,899	16,790
Aritmetický průměr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Koeficient šikmosti	-0,009	-0,026	-0,017	-0,033	-0,034	-0,045
Koeficient špičatosti	0,151	0,128	0,278	0,227	0,840	0,887

V prvním případě se směrodatné odchylky liší až v hodnotě setin. Rozdíly mezi minimy jsou asi 6 %, zbytek charakteristik má rozdíl do 1 %.

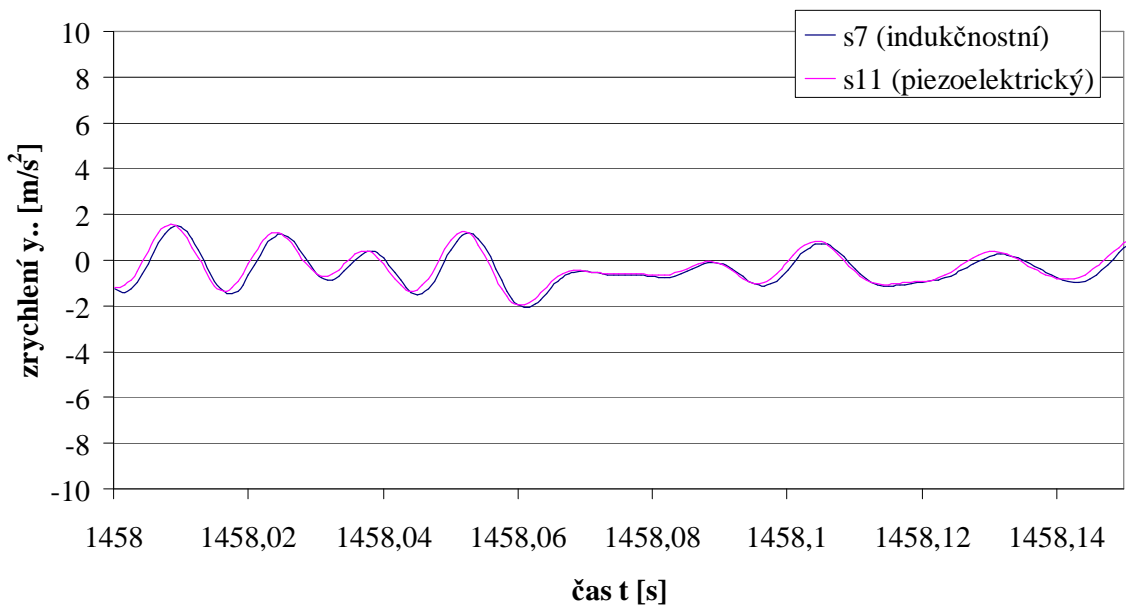
Ve druhém případě je rozdíl směrodatných odchylek asi 2 %, ostatní statistické charakteristiky se liší okolo 2 %.

Ve třetím případě se směrodatné odchylky liší asi o 5 %, ostatní charakteristiky do 9 %.

Na následujících obrázcích jsou na ukázkou zobrazeny průběhy nevycentrovaných dat ve vybraném časovém úseku 0.15 sekund z každého souboru.

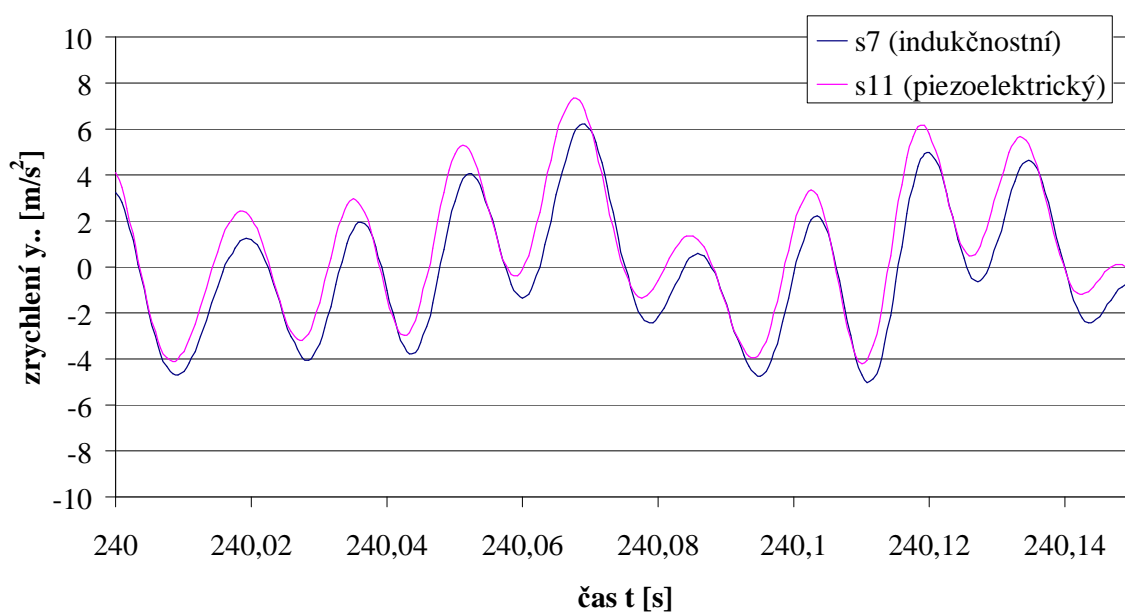


**Obr. 32** Porovnání průběhů v příčném směru u snímačů na rámu podvozku



**Obr. 33** Porovnání průběhů v příčném směru u snímačů na rámu podvozku



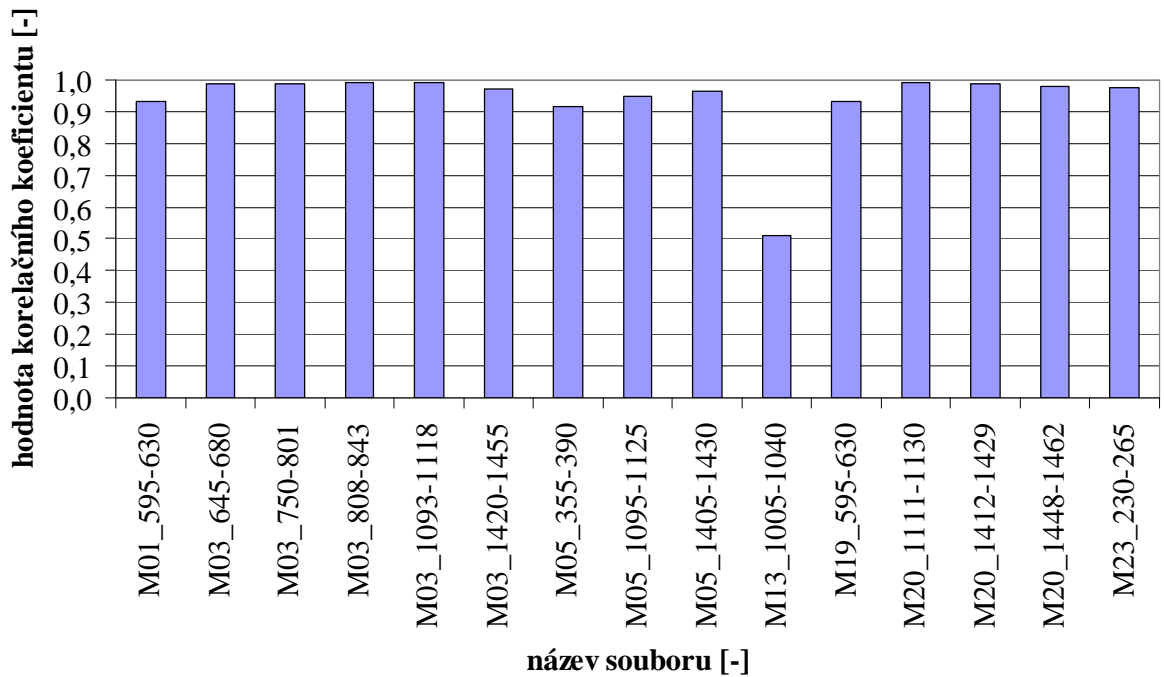


*Obr. 34 Porovnání průběhů v příčném směru u snímačů na rámu podvozku*

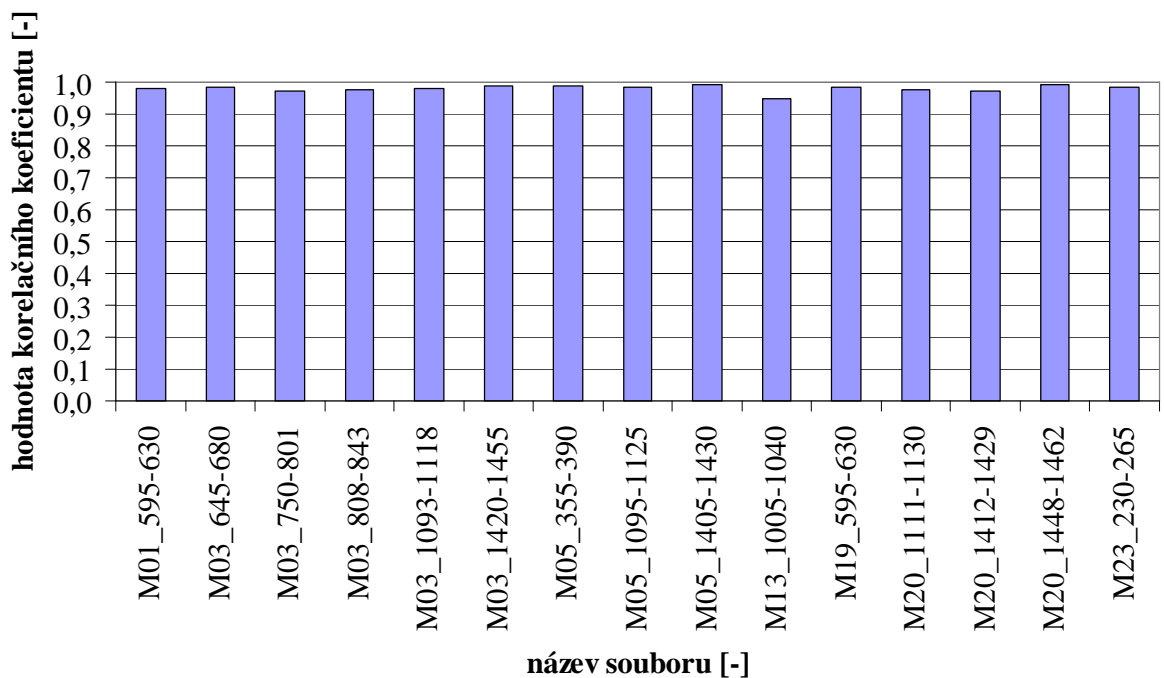
## 6.4. Koeficienty korelace

Nyní dojde k určení vzájemné závislosti mezi daty ze snímačů měřících na jednom měřicím místě za pomoci korelačního koeficientu. Ten byl vypočítán v programu MS Excel 2003 statistickou funkcí, která funguje na stejném principu jako vztah (5).

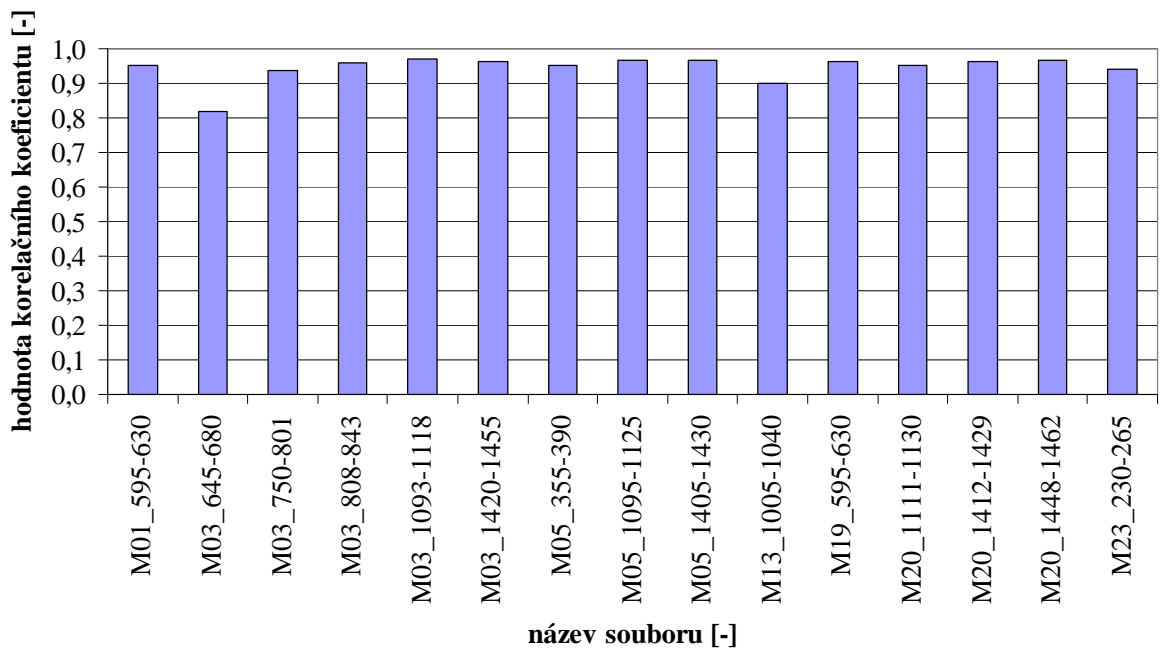
Na **obr. 35**, **obr. 36** a **obr. 37** jsou ukázány korelační koeficienty mezi indukčonními a piezoelektrickými snímači. Na základě teorie lze říci, že mezi daty z indukčonních snímačů a daty z piezoelektrických snímačů existuje v drtivé většině funkční závislost, ve zbylých případech se jedná o velmi těsný vztah mezi daty z tohoto typu snímačů.



**Obr. 35** Korelační koeficienty mezi daty z indukčního (s2) a piezoelektrického snímače, (s9,) umístěného na přední ložiskové skříni ve směru jízdy měřící svislý směr zrychlení



**Obr. 36** Korelační koeficienty mezi daty z indukčního (s12) a piezoelektrického snímače (s10), umístěného na zadní ložiskové skříni ve směru jízdy měřící svislý směr zrychlení



*Obr. 37 Korelační koeficienty mezi daty z indukčního (s7) a piezoelektrického snímače, (s9) umístěného na rámu podvozku měřící příčný směr zrychlení*

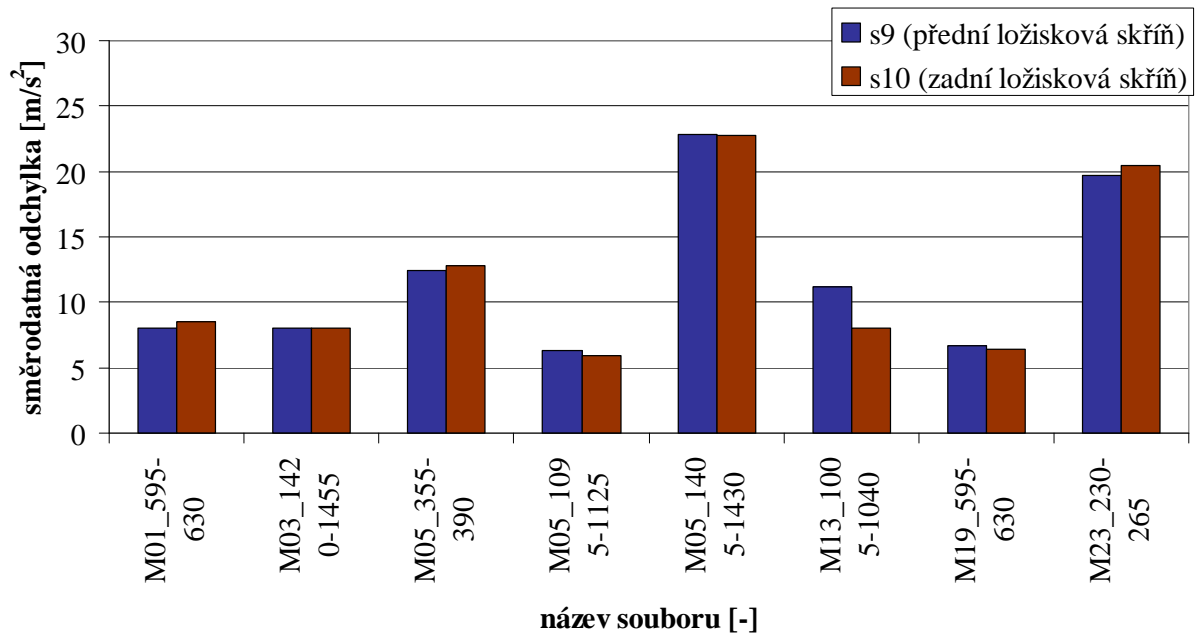
## 6.5. Porovnání snímačů s9 a s10 (svislý směr)

V závěrečné části kapitoly, která se zabývá porovnáním statistických charakteristik z různých typů snímačů, budou porovnány, na rozdíl od předchozích tří podkapitol, dva naprosto shodné piezoelektrické snímače, z nichž první (s9) se nachází na přední ložiskové skříni ve směru jízdy a druhý (s10) na zadní ložiskové skříni ve směru jízdy.

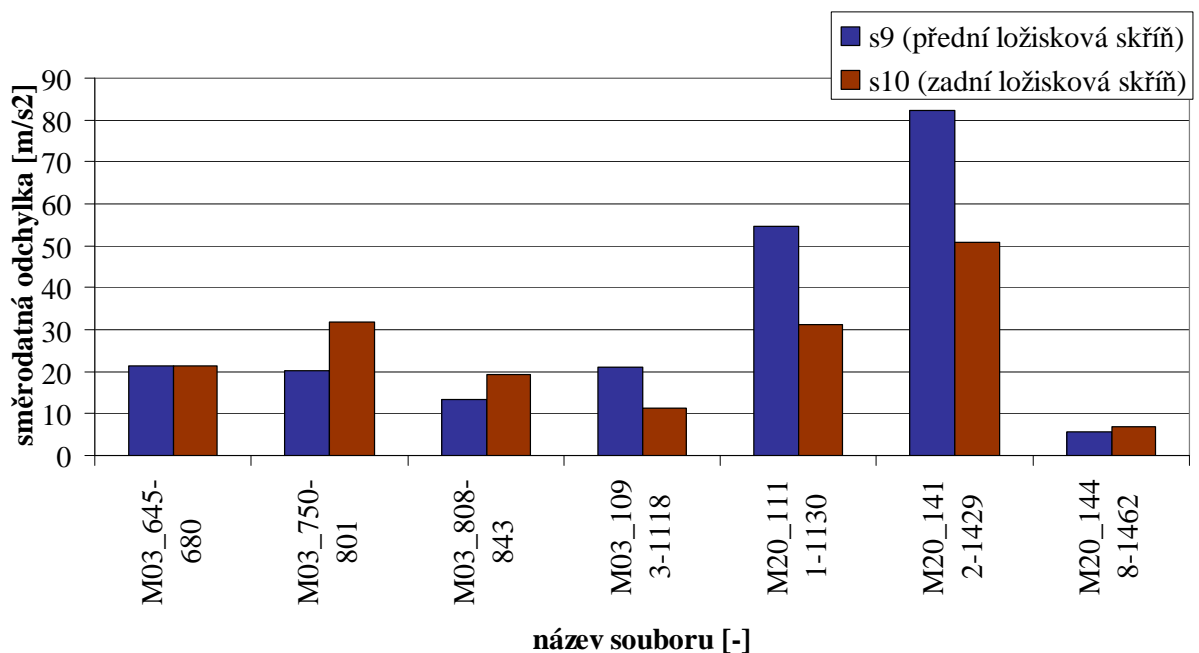
Data byla zfiltrována filtrovacím programem s pásmovou propustí 1- 450 Hz (tentokrát na základě charakteristiky piezoelektrických snímačů). Následně bylo opět oříznuto prvních 5 sekund z datového záznamu a byly získány statistické charakteristiky stejným způsobem jako v předchozích případech. V tomto případě budou základními srovnávacími kritérii směrodatná odchylka, 0.15 % kvantil a 99.85 % kvantil.

Na **obr. 38** až **obr. 41** jsou zobrazeny směrodatné odchylky, resp. kvantily v přímé koleji. Rozdíly mezi směrodatnými odchylkami jsou maximálně 6 % vyjma směrodatných odchylek u souboru M13\_1005-1040, u kterých činí rozdíl téměř 30 %. Procentuální rozdíl mezi kvantily je do 10 %, ve většině případů však do 5 %, opět vyjma souboru M13\_1005-1040, kde se jedná o 30 %.

V rámci této práce se nepodařilo zjistit příčinu velkých procentuálních rozdílů ve statistických charakteristikách dat ze souboru M13\_1005-1040, a to ani v průběžích dat.



**Obr. 38** Porovnání směrodatných odchylek u piezoelektrických snímačů ve svislém směru v přímé koleji



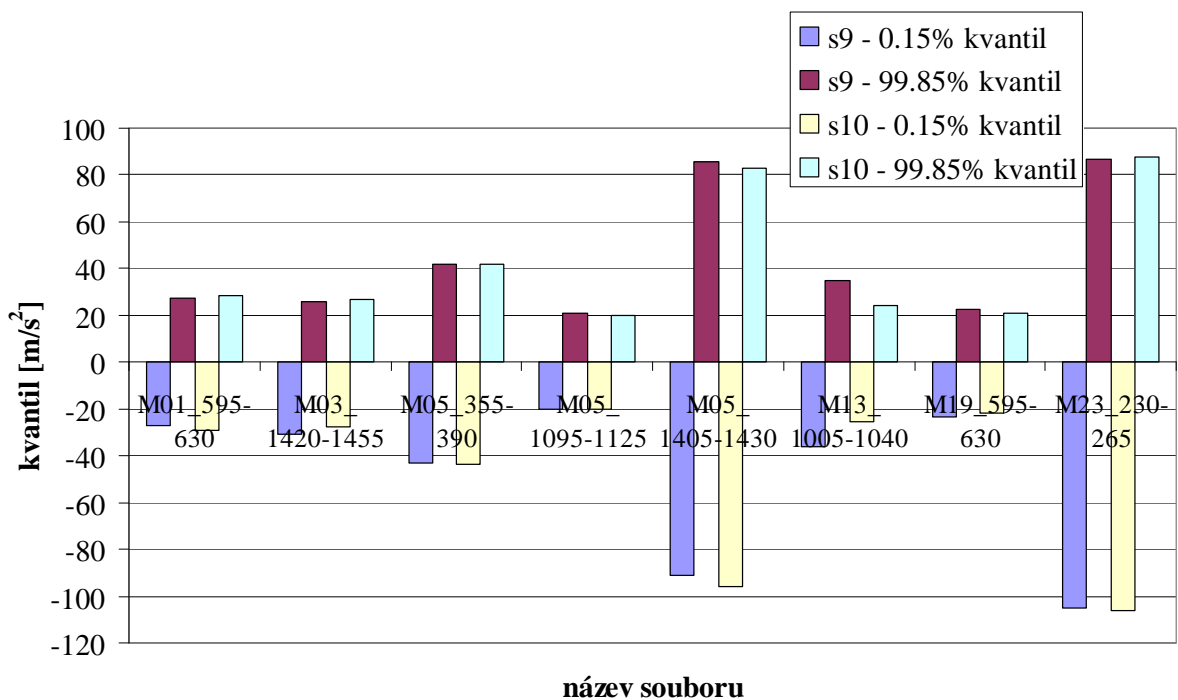
**Obr. 39** Porovnání směrodatných odchylek u piezoelektrických snímačů ve svislém směru v oblouku

Na **obr. 40** a **obr. 41** jsou zobrazeny směrodatné odchylky, resp. kvantily 0.15 % a 99.85 % svislého zrychlení při jízdě v oblouku. Procentuální rozdíly ve směrodatných odchylkách jsou u některých dat až 60 %, a to ze souborů M03\_1093-1118, M20\_1111-1130

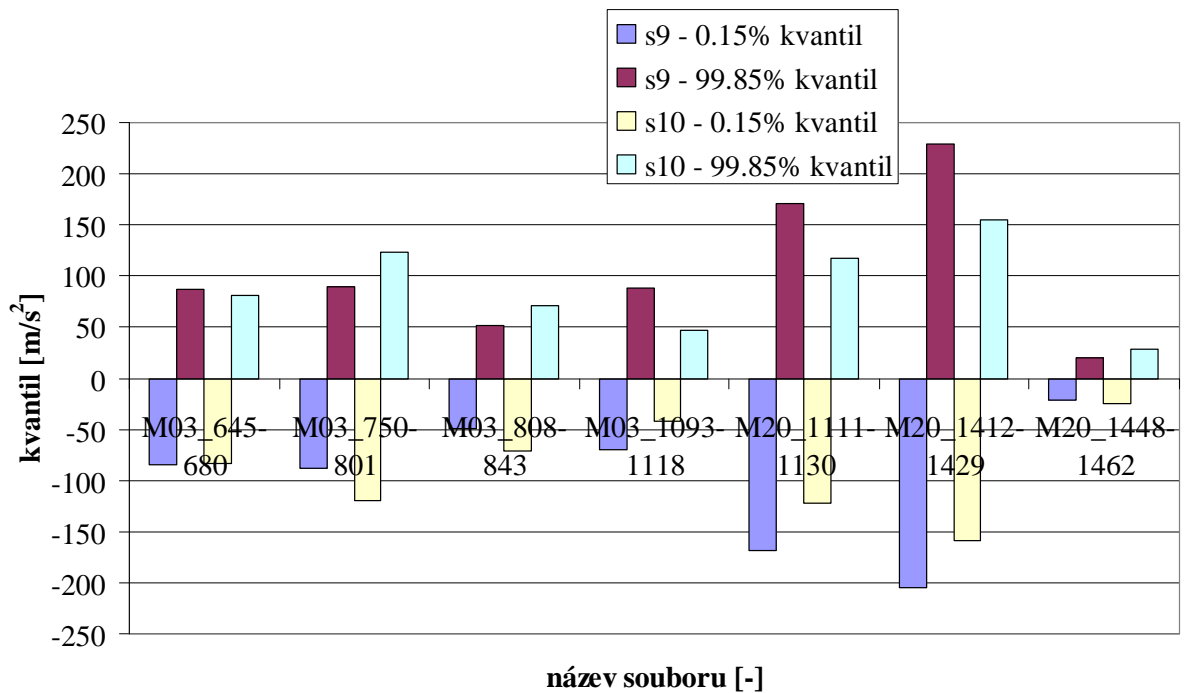
a M20\_1412-1429. Vzhledem k tomu, že se jednalo o oblouky, kde se výrazně v průbězích projevovala vysokofrekvenční složka pravděpodobně způsobená vlnkovitostí vnitřní kolejnice, existovalo podezření, že právě ta má vliv na velký rozdíl mezi směrodatnými odchylkami u těchto souborů.

Proto bylo přikročeno ještě k jedné filtraci, tentokrát s pásmovou propustí 1 – 150 Hz, která měla odstranit vysokofrekvenční složky. Předpoklad se ale nepotvrdil, naopak rozdíly se ještě prohloubily až k 65 %.

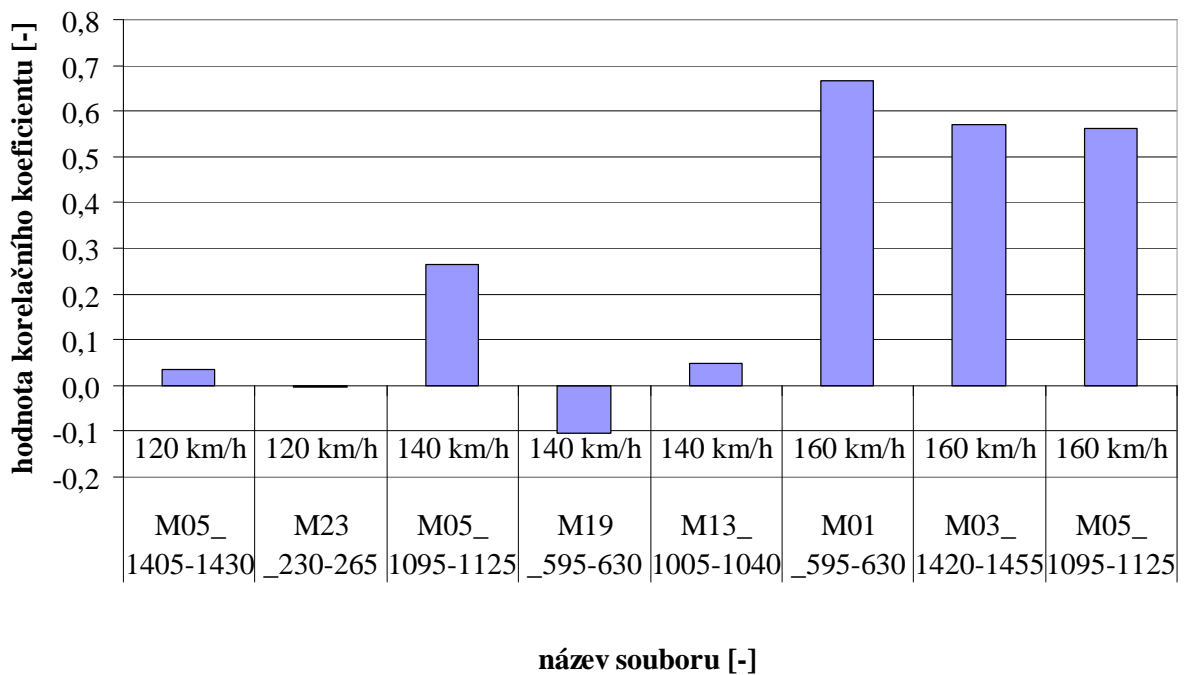
Příčinu rozdílů lze tedy patrně hledat v rozdílném postavení obou kol podvozku v oblouku. Pravděpodobně by se tak daly srovnávat jenom například oblouky o stejném poloměru na nemodernizované a modernizované trati a podobně.



**Obr. 40** Porovnání kvantilů u piezoelektrických snímačů ve svislém směru v přímé koleji



**Obr. 41** Porovnání kvantilů u piezoelektrických snímačů ve svislém směru v oblouku



**Obr. 42** Korelační koeficienty mezi daty naměřenými na přední ložiskové skříni a na zadní ložiskové skříni.

Na předchozím obrázku jsou znázorněny korelační koeficienty mezi daty naměřenými na přední ložiskové skříni a na zadní ložiskové skříni v přímé koleji. Postup byl takový, že na základě rychlosti jízdy a vzdálenosti ložiskových skříní, byla data z přední a zadní ložiskové

skříně srovnána vedle sebe programem MS Excel 2003 tak, že první hodnota obou datových záznamů odpovídala počáteční dráze přední ložiskové skříně. Hodnota korelačního koeficientu byla určena pomocí statistické funkce.

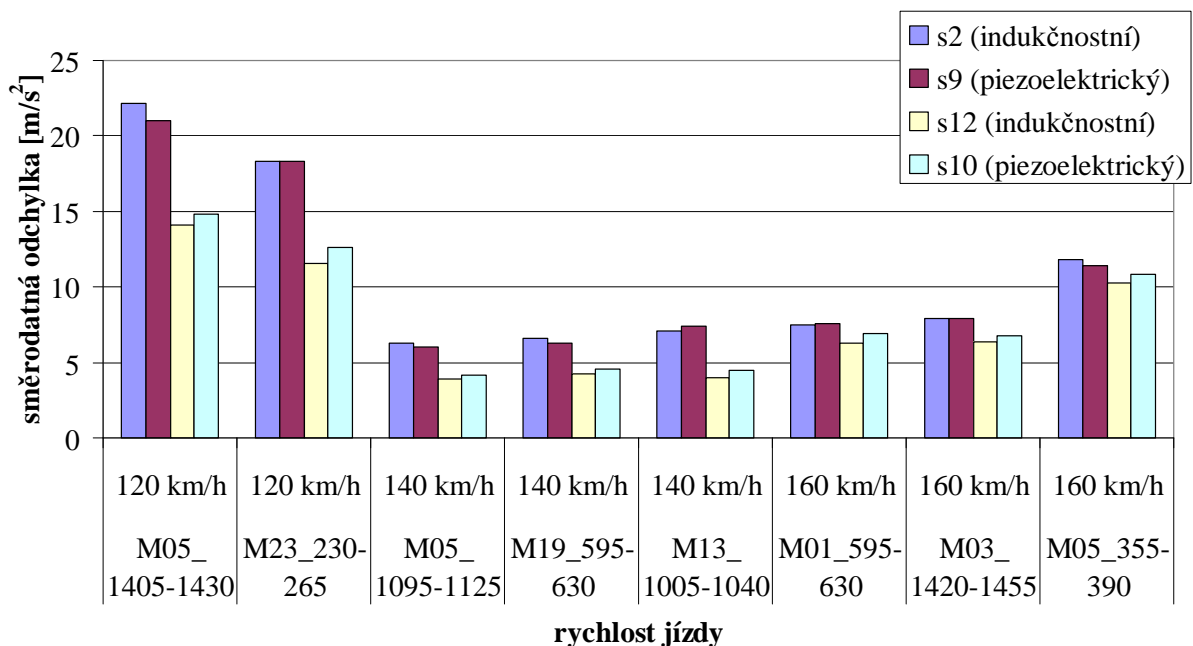
Při rychlosti 120 km/h na nemodernizované trati nebyla zjištěna žádná závislost. Při rychlosti 140 km/h na modernizované trati už byla u jednoho z datových souborů zaznamenána hodnota 0,26. A nakonec při rychlosti 160 km/h na modernizované trati korelační koeficienty u všech datových souborů přesáhli hodnotu 0,5, což znamená, že mezi daty existuje velmi těsný vztah.

V oblouku nebyla zjištěna závislost mezi daty z přední a zadní ložiskové skříně.

## 7. Porovnání statistických charakteristik naměřených dat z různých jízd

V této kapitole budou porovnávány zejména směrodatné odchylky a 0.15 % a 99.85 % kvantily z jednotlivých jízd mezi sebou buď v přímé koleji, kde bude sledována jejich závislost na rychlosti jízdy, nebo v oblouku, kde bude naopak sledována jejich závislost na poloměru oblouku.

### 7.1. Závislost na rychlosti



**Obr. 43** Porovnání směrodatných odchylek všech snímačů ve vswlém směru při různých rychlostech jízdy

Při rychlosti jízdy 120 km/h na nemodernizované trati se pohybuje u snímačů s2 a s9 průměrná směrodatná odchylka okolo 20 m/s<sup>2</sup>. Rozdíl asi 5 m/s<sup>2</sup> mezi těmito dvěma úseky může být způsoben rozdílným stavem svršku.

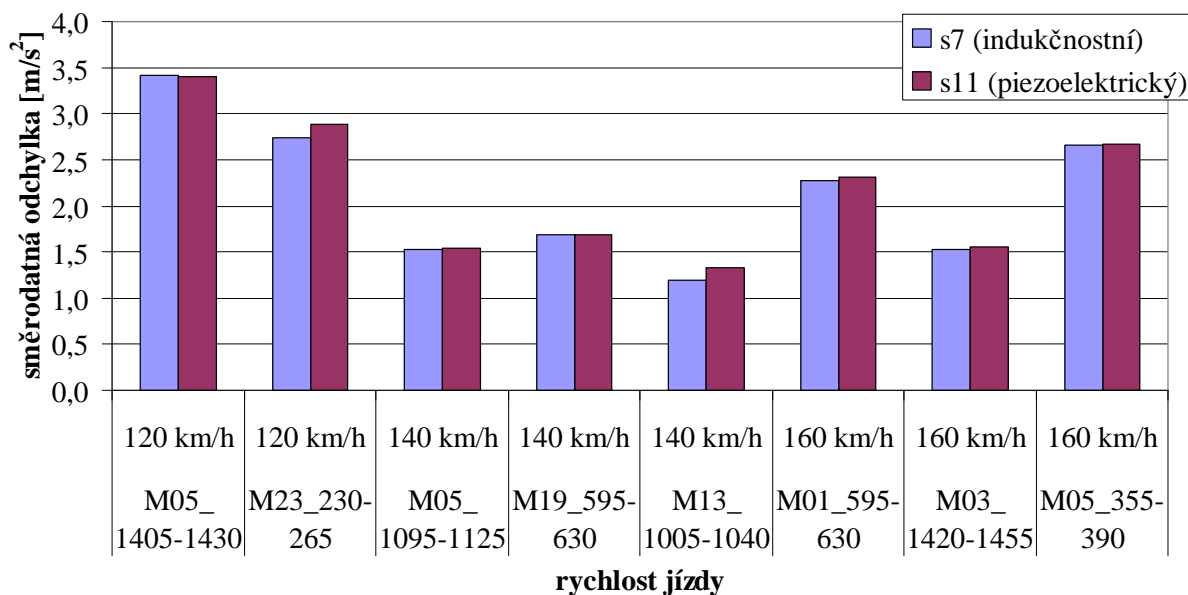
Při rychlosti jízdy 140 km/h je směrodatná odchylka u snímačů s2 a s9 na rozdíl od měřených úseků s rychlostí jízdy 120 km/h jen kolem 7 m/s<sup>2</sup>, což je ovšem dáno tím, že na rozdíl od úseků s traťovou rychlostí 120 km/h se jedná o modernizovanou trať. Rozdíly mezi jednotlivými úseky jsou minimální.

Zato při traťové rychlosti 160 km/h je sice směrodatná odchylka průměrně 9 m/s<sup>2</sup> u snímačů s2 a s9, což by teoreticky odpovídalo předpokladu, že čím vyšší je rychlost, tím vyšší je také směrodatná odchylka, ale rozdíl mezi úseky M01\_595-630 a M03\_1420-1455



a úsekem M05\_355-390 je asi 30 %. Podle průběhu dat je pravděpodobné, že rozdíl je způsoben horší kvalitou svršku u úseku M05\_355-390.

Co se týče snímačů s12 a s10, tak komentář k nim by byl podobný jako u snímačů s2 a s9. Nižší hodnota směrodatných odchylek je způsobena nižší filtrační frekvencí (150 Hz namísto 350 Hz u snímačů s2 a s9), čímž došlo k odfiltrování některých složek, které jsou naopak u snímačů s2 a s9 v hodnocení zahrnuty.

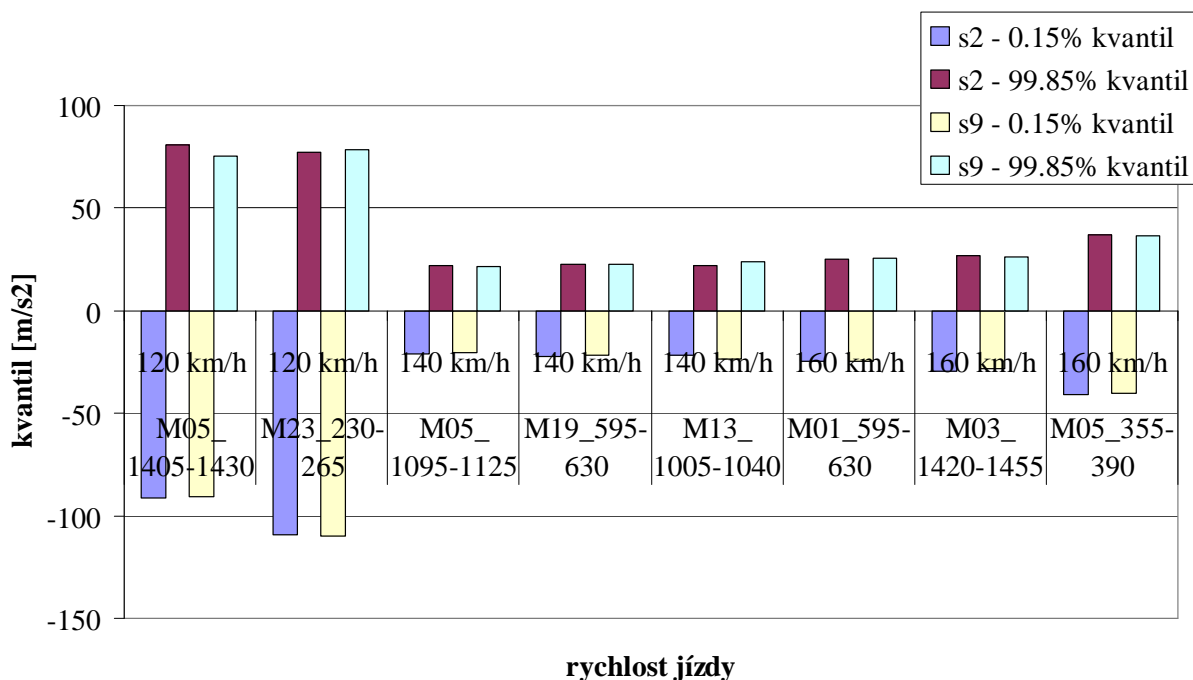


**Obr. 44** Porovnání směrodatných odchylek všech snímačů v příčném směru při různých rychlostech jízdy

V příčném směru se při traťové rychlosti 120 km/h na nemodernizované trati pohybuje hodnota směrodatné odchylky okolo 3 m/s<sup>2</sup>, rozdíly mezi oběma úseky jsou minimální.

Při traťové rychlosti 140 km/h se směrodatná odchylka pohybuje okolo 1,5 m/s<sup>2</sup> na modernizované trati, což je asi polovina hodnoty směrodatné odchylky při traťové rychlosti 120 km/h, ale na nemodernizované trati.

Při traťové rychlosti 160 km/h je sice průměrná směrodatná odchylka okolo 2 m/s<sup>2</sup>, ale procentuální rozdíl mezi úsekem M01\_595-630 a M03\_1420-1455 je asi 32 % a mezi úsekem M05\_355-390 a M03\_1420-1455 42%, absolutně asi 1,1 m/s<sup>2</sup>.

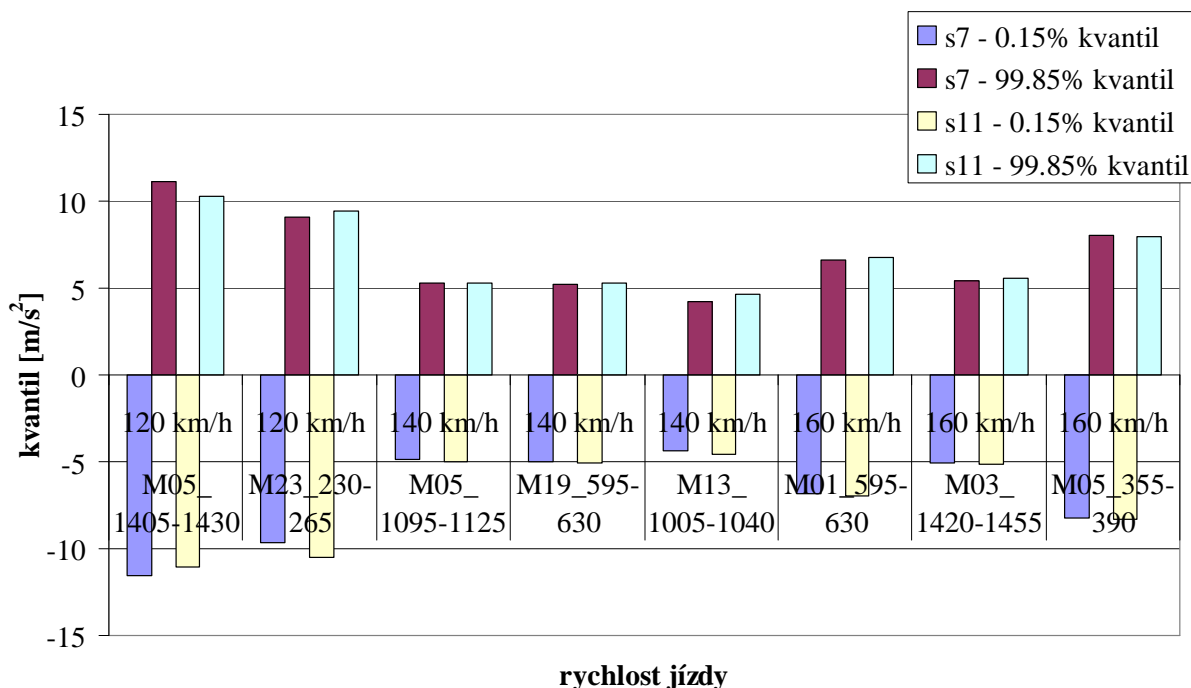


**Obr. 45** Porovnání 0,15 % kvantilu a 99,85 % kvantilu ve vswlém směru u snímačů s2 a s9

Na **obr. 45** je znázorněno porovnání kvantilů 0,15% a 99,85% při rychlostech jízdy 120, 140 a 160 km/h u snímačů s2 a s9. (Porovnání u snímačů s12 a s10 není nutné, protože hodnoty se od hodnot ze snímačů s2 a s9 příliš nelišily.) Na první pohled je markantní rozdíl mezi hodnotami obou kvantilů při traťové rychlosti 120 km/h oproti oběma kvantilům při rychlostech jízdy 140 a 160 km/h. Je to zapříčiněno tím, že úseky s traťovou rychlostí 120 km/h jsou nemodernizované, oproti tomu úseky s rychlostí jízdy nad 140 km/h jsou modernizované.

Procentuální rozdíl mezi úseky s rychlostí jízdy 120 km/h na staré trati a úseky s rychlostí jízdy 140 km/h je téměř 80 % v kvantilu 0,15 % a téměř 70 % v kvantilu 99,85 %. Procentuální rozdíl mezi úseky s rychlostí jízdy 120 km/h na staré trati a 160 km/h na nové trati je v obou výše zmiňovaných kvantilech asi o 10 % menší než v předchozím případě.

Rozdíly mezi úseky s rychlostí jízdy 140 km/h a 160 km/h jsou nepatrné, vesměs odpovídající předpokladu, že čím větší je rychlost, tím větší je rozdíl mezi dolním a horním kvantilem.



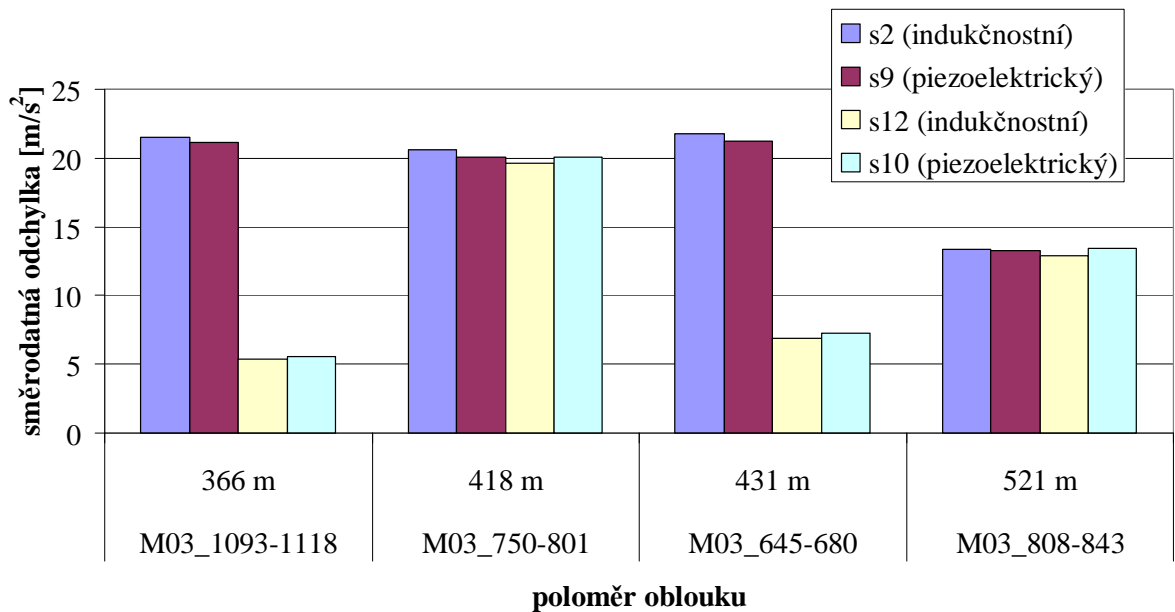
**Obr. 46** Porovnání 0,15 % kvantilu a 99,85 % kvantilu ve příčném směru u snímačů s7 a s11

Porovnání kvantilů 0,15 % a 99,85 % při rychlostech jízdy 120, 140 a 160 km/h v příčném směru u snímačů s7 a s11 je znázorněno na **obr. 46**. V tomto případě není rozdíl mezi oběma kvantily při rychlosti jízdy 120 km/h a mezi oběma kvantily při rychlostech jízdy 140 a 160 km/h takový jako ve směru svislém.

Procentuální rozdíl mezi úseky s rychlostí jízdy 120 km/h na nemodernizované trati a úseky s rychlostí jízdy 140 km/h je okolo 50 % jak v kvantilu 0,15 %, tak i v kvantilu 99,85 %. Procentuální rozdíl mezi úseky s traťovou rychlostí 120 km/h na nemodernizované trati a 160 km/h na modernizované trati je v obou výše zmiňovaných kvantilech necelých 40 %.

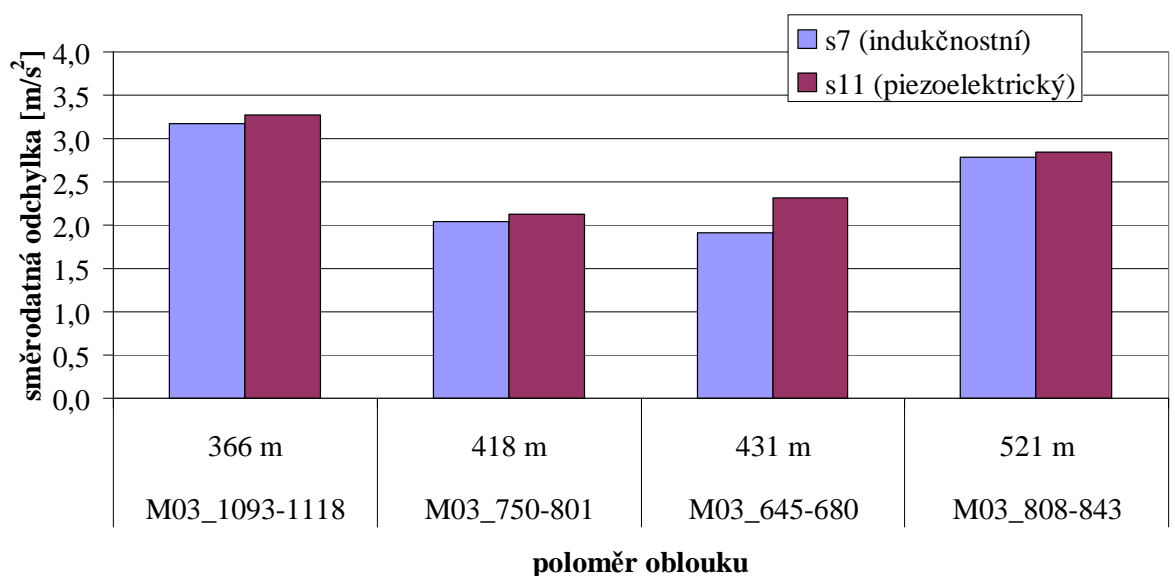
## 7.2. Závislost na poloměru oblouku

V předchozí kapitole se porovnávalo příčné a svislé zrychlení při různých rychlostech na úsecích o různé kvalitě svršku v přímé koleji. Nyní bude následovat analýza výsledků při jízdě obloukem.



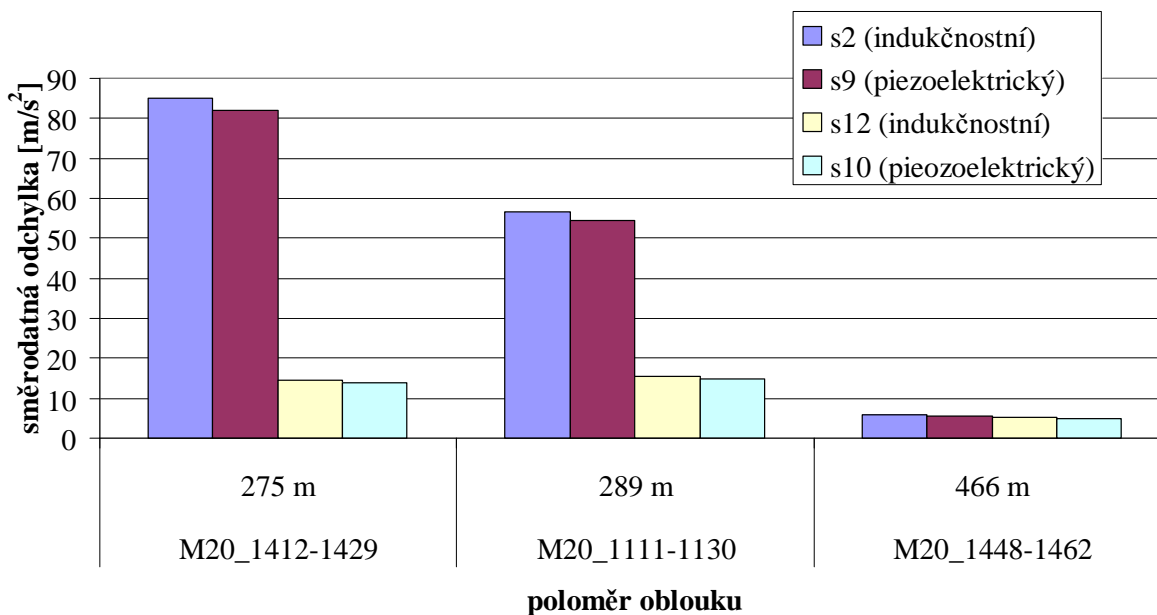
**Obr. 47** Porovnání směrodatných odchylek všech snímačů ve svislém směru v oblouku

Na **obr. 47** je znázorněno porovnání všech snímačů ve svislém směru zrychlení. Rozdíly mezi párem na přední ložiskové skříně (s2 a s9) a na zadní ložiskové skříně (s12 a s10) lze zdůvodnit tím, že byly filtrovány jinou frekvencí, která byla u s12 a s10 nižší, čímž se u s2 a s9 projeví vysokofrekvenční složky ovlivněné pravděpodobně vlnkovitostí vnitřní kolejnice. Po pokusném zfiltrování dat ze snímačů s2 a s9 stejnou frekvencí jako u snímačů s12 a s10 byly již rozdíly mezi nimi nepatrné. V tomto případě vysokofrekvenční složky značně ovlivňují měření zrychlení ve svislém směru a jejich vliv záleží potom jenom na filtrovací frekvenci.



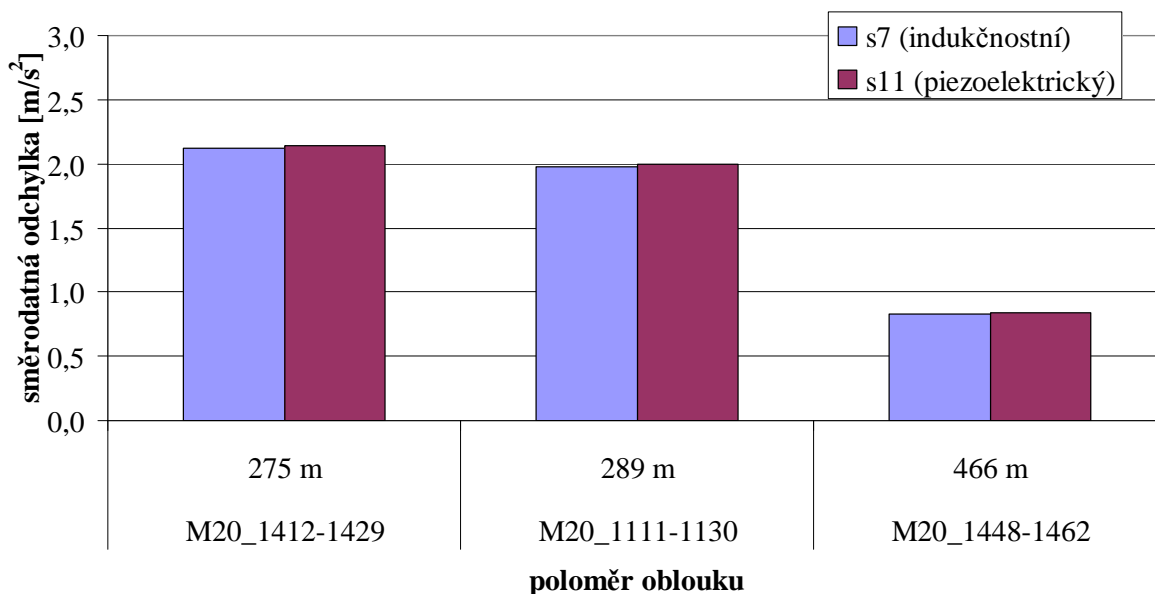
**Obr. 48** Porovnání směrodatných odchylek všech snímačů ve příčném směru v oblouku

**Obr. 48** porovnává směrodatné odchytky všech snímačů v příčném směru v oblouku. Směrodatné odchytky v obloucích o poloměru 418 m a 431 m jsou podobné, zato v oblouku o poloměru 521 m je vyšší. Průběh dat je v tomto úseku nestacionární, pravděpodobně vzhledem k mnohem horší kvalitě svršku než v předchozích dvou úsecích. Úsek o poloměru oblouku 366 m je na rozdíl od předchozích úseků na modernizované trati, takže se s nimi nedá objektivně porovnávat. Je zde uveden jen proto, že pochází ze stejného měření.



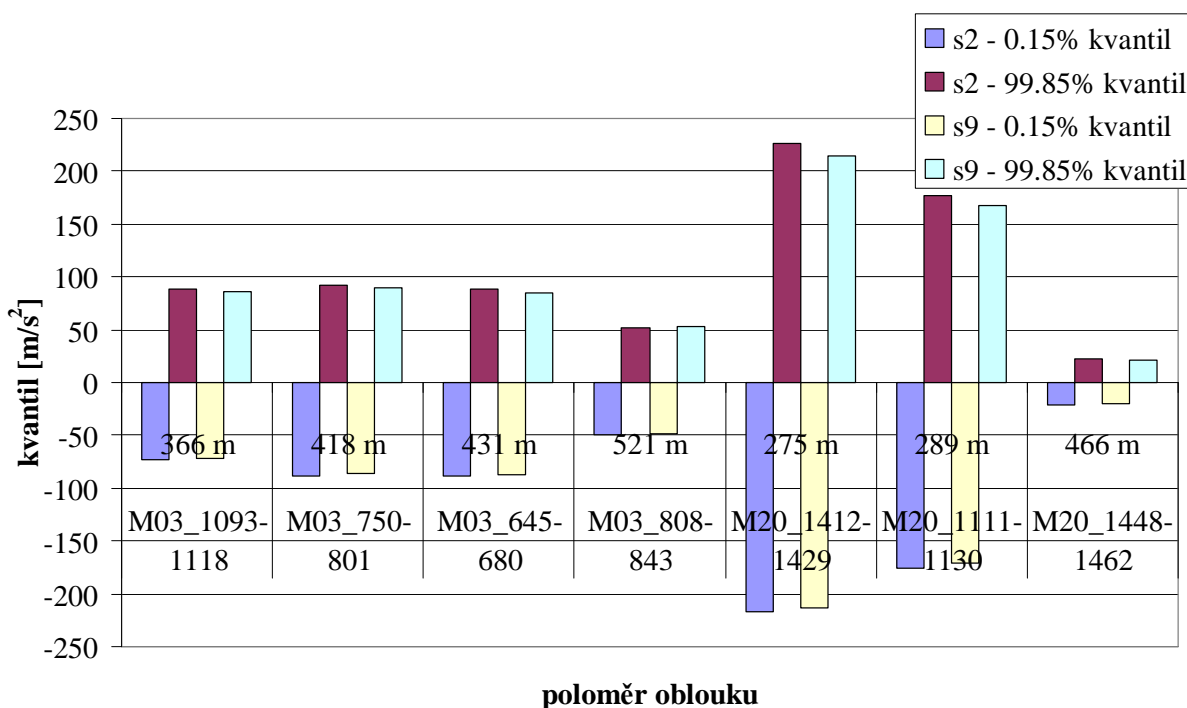
**Obr. 49** Porovnání směrodatných odchylek všech snímačů ve svislém směru v oblouku

Na **obr. 49** je opět viditelný u některých oblouků značný rozdíl mezi párem snímačů (s2 a s9) na přední ložiskové skříni a párem snímačů (s12 a s10) na zadní ložiskové skříni. Příčinou jsou již výše zmíněné vysokofrekvenční složky. Po pokusném zfiltrování páru snímačů z přední ložiskové skříně stejnou frekvencí, jakou byl filtrován zadní pár, se směrodatná odchylka předního páru výrazně přiblížila směrodatné odchylce zadního páru. Pak také platilo, že čím menší byl poloměr oblouku, tím větší byla směrodatná odchylka.



**Obr. 50** Porovnání směrodatných odchylek všech snímačů ve příčném směru v oblouku

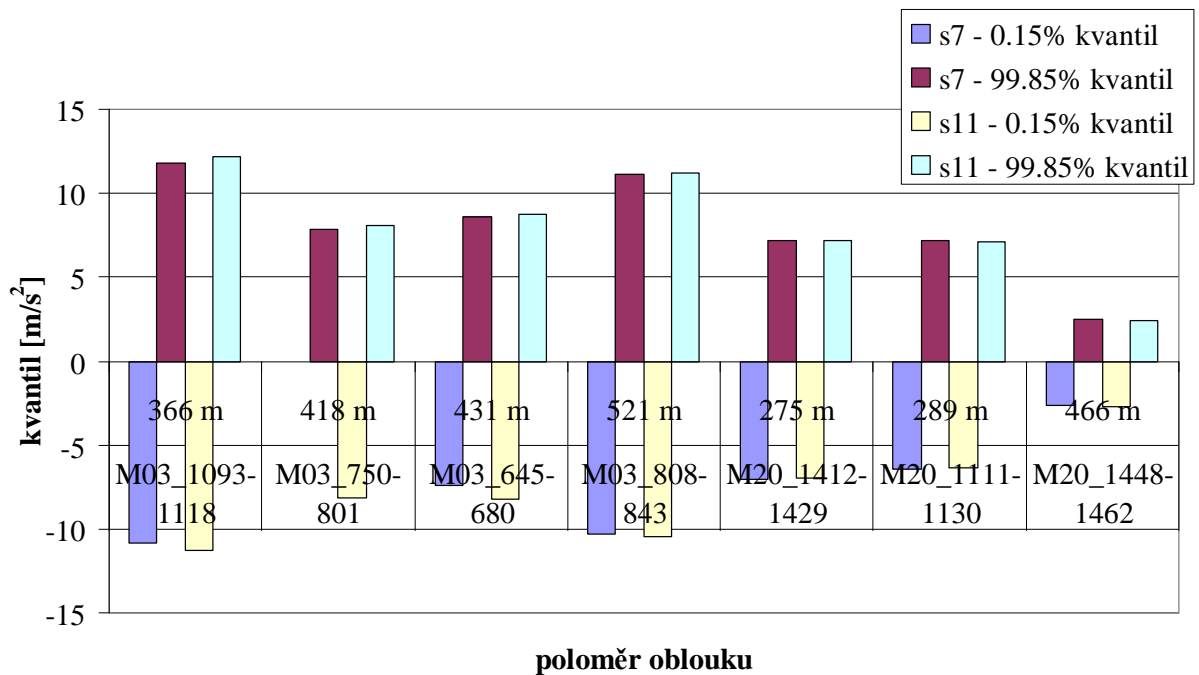
**Obr. 50** porovnává směrodatné odchylky snímačů v příčném směru zrychlení. Z výše uvedeného zobrazení vyplývá, že v příčném směru na modernizované trati se je směrodatná odchylka nepřímo úměrná poloměru oblouku.



**Obr. 51** Porovnání kvantilů všech snímačů ve svislém směru v oblouku

**Obr. 51** porovnává 0.15 % a 99.85 % kvantily ve všech obloucích ve svislém směru u snímačů s2 a s9. (Porovnání u snímačů s12 a s10 není nutné, protože hodnoty se od hodnot

ze snímačů s2 a s9 příliš nelišily). Na první pohled je patrný velký rozdíl mezi úseky o poloměru oblouku 275 m a 288 m, což je zapříčiněno opět vysokofrekvenčními složkami. Úseky o poloměru oblouku 418 m, 431 m a 521 m se nacházejí na nemodernizované trati. Zbytek úseků je na novém svršku.



**Obr. 52** Porovnání kvantilů všech snímačů ve příčném směru v oblouku

**Obr. 52** porovnává 0.15 % a 99.85 % kvantily u snímačů měřící příčný směr zrychlení. Úseky o poloměru oblouku 366 m, 275 m, 289 m a 466 m se nachází na modernizované trati, ostatní pak na nemodernizované trati.

## 8. Závěr

Cílem této práce bylo statisticky vyhodnotit data z měření zrychlení na železničním vozidle a srovnat výsledky měření různými typy snímačů a v různých úsecích tratí.

První část práce byla zaměřena porovnávání různých typů snímačů. Při měření zrychlení na železničním vozidle byly souběžně použity indukčnostní a piezoelektrické snímače. Účelem statistického vyhodnocení naměřených dat z obou typů snímačů bylo srovnání jejich výsledků a vzájemné odchylky. Základním srovnávacím kritériem byla směrodatná odchylka. Prvotní vyhodnocení dat ukázalo odchylky mezi hodnotami naměřenými oběma typy snímačů až 80 %. Velká chyba plyne především z různého frekvenčního rozsahu snímačů.

Následně byla data filtrována filtry s dolní propustí, jejíž hodnota vycházela z charakteristik indukčnostních snímačů. Vyhodnocením filtrovaných dat bylo zjištěno zmenšení odchylek na maximálně 20 %, ve většině případů však do 5 %. Dále bylo potřeba ověřit vliv nízkofrekvenčních složek na zkreslení signálu z piezoelektrických snímačů. Proto byla provedena filtrace s pásmovou propustí. Vyhodnocení dat filtrovaných pásmovou propustí ukázalo odchylky vůči datům filtrovaným dolní propustí řádově v setinách procenta. Pro další vyhodnocování byla kromě porovnávání dvou piezoelektrických snímačů mezi sebou použita data filtrovaná pouze dolní propustí.

V práci byly dále srovnávány výsledky měření piezoelektrickými snímači na ložiskových skříních prvního a druhého dvojkolí podvozku. Data byla vyhodnocena stejným způsobem jako v předchozích případech. V přímé koleji byl zjištěn jejich průměrný procentuální rozdíl cca 3 %. V oblouku dosahovaly odchylky někdy hodnot až 60 %. Nepotvrdilo se však, že na to mají vliv vysokofrekvenční složky. Lze tak pouze konstatovat, že při jízdě obloukem je vlivem postavení vozidla v oblouku podstatný rozdíl ve statistických charakteristikách dat naměřených na ložiskových skříních první a druhé nápravy podvozku.

Další část práce se zabývala porovnáváním zrychlení naměřených v různých úsecích tratě. Měření bylo provedeno celkem v 15 úsecích, z nichž bylo 8 v přímé koleji a 7 v oblouku. Pro účel porovnání byly vyhodnoceny úseky v přímé koleji a v oblouku zvlášť.

V přímé koleji byla sledována závislost směrodatné odchylky a vybraných kvantilů na rychlosti jízdy. V úsecích na modernizované trati prakticky platila přímá úměra směrodatné odchylky (rozptylu) na rychlosti jízdy. Na nemodernizované trati bylo měření provedeno pouze při rychlosti jízdy 120 km/h, takže nebylo možné zjistit závislost statistických charakteristik na rychlosti jízdy. Hodnoty směrodatných odchylek naměřeného zrychlení na nemodernizované trati při rychlosti jízdy 120 km/h byly asi trojnásobně vyšší ve srovnání s hodnotami naměřeným na modernizované trati při rychlosti jízdy 140 km/h.

V úsecích v oblouku se zjišťovala závislost směrodatné odchylky a vybraných kvantilů na poloměru oblouku. Vypovídající hodnotu porovnání snižovaly vysokofrekvenční složky



signálu v obloucích malých, rozdílná rychlost jízdy v jednotlivých obloucích a rozdílný stav svršku zejména na nemodernizované trati.

## 9. Seznam použité literatury

- [1] REMEK, B.: *Experimentální měření v dopravní technice*. Praha : ČVUT, 1. vydání, 2004. 150 s. ISBN 80-01-03057-1
- [2] KALINČÁK, D., FITZ, P., ISTEBNÍK, R., LABUDA, R., LANG, A., ŘEZNÍČEK, R.: *Skúšanie v dopravnej a manipulačnej technike*. Žilina: EDIS Žilina, 1.vydání, 2002. 195 s. ISBN 80-7100-932-6
- [3] BLAŠKOVÁ, V.: *Statistika I*. Brno: Mendlova zemědělská a lesnická univerzita, 1. vydání, 2009. 228 s. ISBN 978-80-7375-286-6
- [4] ANDĚL, J.: *Matematická statistika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1. vydání, 1978. 346 s.
- [5] Poznámky z předmětu Technické měření (KDPD/PTEKP) – Ing. Martin Kohout
- [6] Poznámky z předmětu Teorie pravděpodobnosti a mat. statistika (KID/PPSTP) – Mgr. Věra Záhorová, PhD.